



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAVTELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PŘEVODNÍKY NAPĚTÍ NA FREKVENCI VOLTAGE TO FREQUENCY CONVERTERS

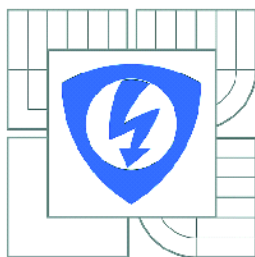
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN ŠIŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID KUBÁNEK, Ph.D.



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Martin Šiška
Ročník: 3

ID: 115285
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Převodníky napětí na frekvenci

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou převodu napětí na frekvenci. Prostudujte stávající řešení a zhodnoťte jejich vlastnosti z hlediska přesnosti a rozsahu převodu, časových poměrů výstupního signálu (doba ustálení, rychlost přeběhu) apod. Zaměřte se na integrovaný obvod AD650 firmy Analog Devices nebo podobný, který umožňuje po doplnění několika pasivními součástkami převod napětí na frekvenci a naopak až do 1 MHz. Navrhněte praktické zapojení převodníku a proveďte počítačové simulace jeho funkce. Poté obvod prakticky realizujte a proveďte měření jeho vlastností.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Hejtmánek, V. Měřič kapacity akumulátorů. Praktická Elektronika, č. 6, 2004
- [2] AD650 Voltage-to-Frequency and Frequency-to-Voltage Converter [online]. c2006,
<http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD650.pdf>

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 2.6.2011

Vedoucí práce: Ing. David Kubánek, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá rozбором problematiky převodu napětí na frekvenci. Práce je rozdělena do pěti kapitol. V první kapitole se věnuje obecným věcem, které se týkají převodu napětí na frekvenci a vlastností tohoto převodu. Ve druhé kapitole se práce zabývá převodníkem sestaveným z diskrétních součástek. Jsou zde také uvedeny výsledky simulace a měření tohoto převodníku. Ve třetí, nejobsáhlejší, kapitole je uveden rozbor převodníku s integrovaným obvodem AD650 včetně výsledků simulace a měření. Ve čtvrté kapitole je uvedeno porovnání výsledků simulace a měření. A konečně v páté kapitole je nastíněna možnost použití převodníků napětí na frekvenci.

Klíčová slova

převodník napětí na frekvenci
napětím řízený oscilátor
integrovaný obvod AD650
nelinearita převodu napětí na frekvenci
integrátor
komparátor
nelinearita převodu

Abstract

This thesis analyzes the issue of transfer voltage to frequency. The thesis is divided into five chapters. The first chapter deals with general matters relating to the transfer voltage to frequency and characteristics of this transfer. In the second chapter, the work deals with the converter assembled from discrete components. There are also the results of simulation and measurement this converter. In the third, the most extensive chapter provides an analysis of the converter with an integrated circuit AD650 including the results of simulation and measurement. In the fourth chapter is a comparison of simulation results and measurements results. Finally the fifth chapter deals with the use of voltage to frequency converters.

Keywords

voltage to frequency converter
voltage control oscillator
integrated circuit AD650
nonlinearity of voltage to frequency convert
integrator
comparator
nonlinearity of conversion

Citace práce

ŠIŠKA, M. Převodníky napětí na frekvenci. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 67s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Kubánek, Ph.D.

Prohlášení o původnosti

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Převodníky napětí na frekvenci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §152 trestního zákona č.140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Kubánkovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Obsah

Úvod.....	7
1. Převod napětí na frekvenci	8
1.1 Převodníky napětí na frekvenci	8
1.2 Parametry převodu napětí na frekvenci	8
2. Převodník napětí na frekvenci sestavený z diskrétních součástek	10
2.1 Princip převodu napětí na frekvenci	10
2.1.1 Integrátor	10
2.1.2 Komparátor.....	11
2.1.3 Zapojení převodníku napětí na frekvenci sestaveného z diskrétních součástek	12
2.1.4 Popis principu převodu napětí na frekvenci	12
2.1.5 Funkce jednotlivých prvků v zapojení	12
2.1.6 Vzor výpočtu	14
2.2 Simulace obvodu a její výsledky	15
2.2.1 Výsledky simulace	15
2.2.2 Zhodnocení výsledků simulace	18
2.3 Výsledky měření obvodu.....	18
2.3.1 Výsledky měření	19
2.3.2 Shrnutí výsledků měření.....	22
2.3.3 Porovnání měření a simulace	22
3. Integrovaný obvod AD650.....	23
3.1 Popis obvodu	23
3.1.1 Generátor jednotlivých pulzů	24
3.2 Princip převodu U/f u obvodu AD650:	24
3.2.1 Integrovací fáze	24
3.2.2 Resetovací fáze.....	25
3.2.3 Výběr externích součástek k převodníku	26
3.2.4 Vzor výpočtu	27
3.3 Výsledky simulace převodníku s integrovaným obvodem AD650	29
3.3.1 Simulace převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=10\text{kHz}$	29
3.3.2 Simulace převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=100\text{kHz}$	32
3.3.3 Simulace převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=500\text{kHz}$	35
3.3.4 Simulace převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=1\text{MHz}$	38
3.3.5 Shrnutí výsledků simulace	41
3.4 Výsledky měření převodníku s integrovaným obvodem AD650	42
3.4.1 Měření převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=10\text{kHz}$	42
3.4.2 Měření převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=100\text{kHz}$	46
3.4.3 Měření převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=500\text{kHz}$	49
3.4.4 Měření převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=1\text{MHz}$	52
3.4.5 Vzor výpočtu	55
3.4.6 Shrnutí výsledků měření.....	55
4. Porovnání výsledků simulace a výsledků měření	57
5. Použití převodníků napětí na frekvenci.....	57
5.1 Obecné využití převodníků napětí na frekvenci	57
5.2 Hlavní použití převodníku využívající obvodu AD650	57
Závěr.....	58
Literatura	59
Seznam obrázků	60
Seznam tabulek	61
Přílohy	62

Úvod

Cílem této práce bylo seznámení se s principem převodu napětí na frekvenci a prostudování integrovaného obvodu od firmy Analog Devices AD650, který plní, po připojení několika pasivních součástek, funkci převodníku napětí na frekvenci. Pro samotné pochopení principu převodu napětí na frekvenci, je důležité znát základy analogové techniky, zejména různá zapojení operačního zesilovače.

Dalšími cíli práce byla simulace převodníku, jeho sestavení a proměření jeho parametrů.

Posledním požadavkem na tuto práci je vytvoření laboratorní úlohy, včetně návodu a teoretického podkladu.

1. Převod napětí na frekvenci

1.1 Převodníky napětí na frekvenci

Převodník napětí na frekvenci je zařízení, které, jak už z názvu vyplývá, mění podle vstupního napětí, které je někdy též nazýváno řídicím napětím, frekvenci výstupního signálu. Tento proces se může dít mnoha způsoby. Principy, které jsou rozebírány v této práci, jsou založeny na analogové technice.

1.2 Parametry převodu napětí na frekvenci

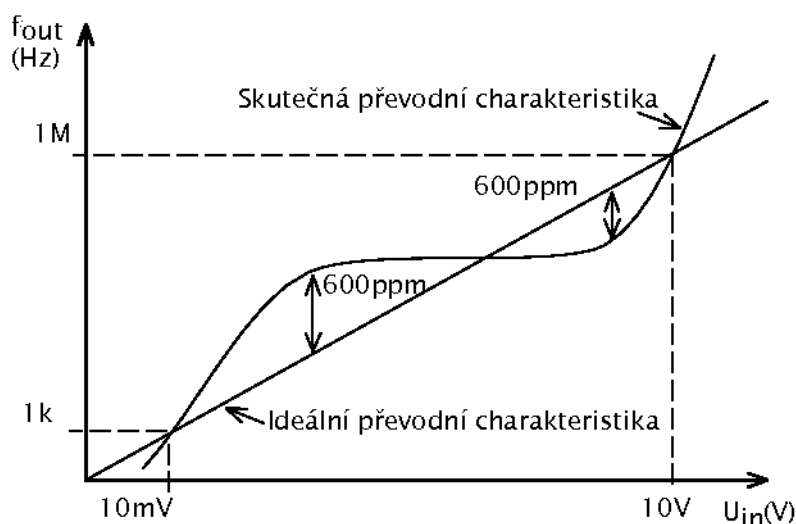
Samotný převod má několik parametrů, z nichž můžeme určit, jak kvalitní je převod. Těmito parametry jsou: převodní charakteristika, nelinearita převodu, časová stabilita, teplotní stabilita a v neposlední řadě doba ustálení výstupní frekvence při skokové změně vstupního napětí. V některých případech může být také dobré znát proudový odběr při různých výstupních frekvencích.

Převodní charakteristika

Převodní charakteristika je obecně závislost výstupní veličiny na veličině vstupní. V případě převodníků napětí na frekvenci, je to tedy závislost výstupní frekvence na vstupním napětí. Jedná se o nejdůležitější parametr celého převodu, ze kterého je možné určit další parametry.

Nelinearita převodu

Nelinearita převodu je absolutní hodnota procentuální odchylky skutečné (naměřené) převodní charakteristiky od ideální (např. vypočítané) převodní charakteristiky. U převodníků napětí na frekvenci se nejčastěji určuje metodou koncového bodu[2].



Obr. 1.1: Určení nelinearity převodu[2]

Nelinearita převodu se spočítá dle vztahu

$$nelinearita = \left| \frac{f_{ideál} - f_{skuteč}}{f_{ideál}} \right| \cdot 100, \quad (1.1)$$

kde $nelinearita$ (%) je nelinearita převodu,
 $f_{ideál}$ (Hz) je ideální hodnota frekvence a
 $f_{skuteč}$ (Hz) je skutečná hodnota frekvence.

Časová stabilita

Obecně je časová stabilita parametr, který určuje, o kolik se změní výstupní veličina, kterou je v našem případě výstupní frekvence, za určitou dobu při konstantní vstupní veličině, tedy při konstantním vstupním napětí. Měření tohoto parametru je velmi časově náročné, proto v práci nebylo prováděno.

Teplotní stabilita

Teplotní stabilita je parametr, který udává, jak se změní výstupní frekvence při změně teploty o 1°C, za předpokladu konstantního vstupního napětí. Tento parametr v práci taktéž měřen není z důvodu časové náročnosti jeho měření.

Doba ustálení výstupní frekvence při skokové změně vstupního napětí

Doba ustálení výstupní frekvence při skokové změně vstupního napětí je parametr udávající, za jak dlouho se ustálí frekvence na nové hodnotě, při skokové změně vstupního napětí. Tento parametr velmi úzce souvisí s principem převodu. Z důvodu složitosti měření, nebyl ani tento parametr v práci zkoumán.

Proudový odběr při různých frekvencích

Při různých hodnotách výstupní frekvence může mít převodník různý proudový odběr. Tato skutečnost je většinou dána vnitřní strukturou zapojení převodníku, výběrem součástek a jejich kvalitou. Požadavkem na kvalitní převodník je, aby měl při výstupní frekvenci na celém rozsahu konstantní proudový odběr.

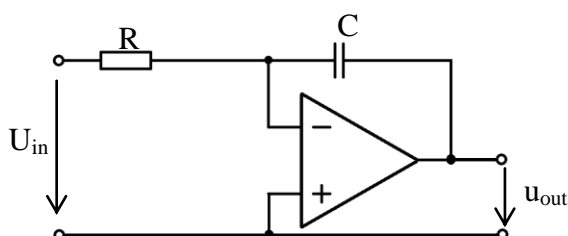
2. Převodník napětí na frekvenci sestavený z diskretních součástek

2.1 Princip převodu napětí na frekvenci

Při této metodě převodu se nevyužívá žádného integrovaného obvodu, plnicího funkce převodníku U/f , ale využívá se pouze operačních zesilovačů a několika dalších pasivních prvků. Operační zesilovače zde plní funkce integrátoru a komparátoru. Obě tyto možnosti zapojení operačního zesilovače jsou popsány v následujících odstavcích.

2.1.1 Integrátor

Integrátor se skládá z operačního zesilovače, rezistoru a kondenzátoru ve zpětné vazbě, tak jak je nakresleno na obrázku 2.1. Na invertující vstup operačního zesilovače je přiváděno vstupní napětí, které se bude integrovat. Neinvertující vstup operačního zesilovače je připojen na zem.



Obr. 2.1: Zapojení operačního zesilovače jako integrátoru [1]

Pro výstupní napětí integrátoru platí vztah [1]

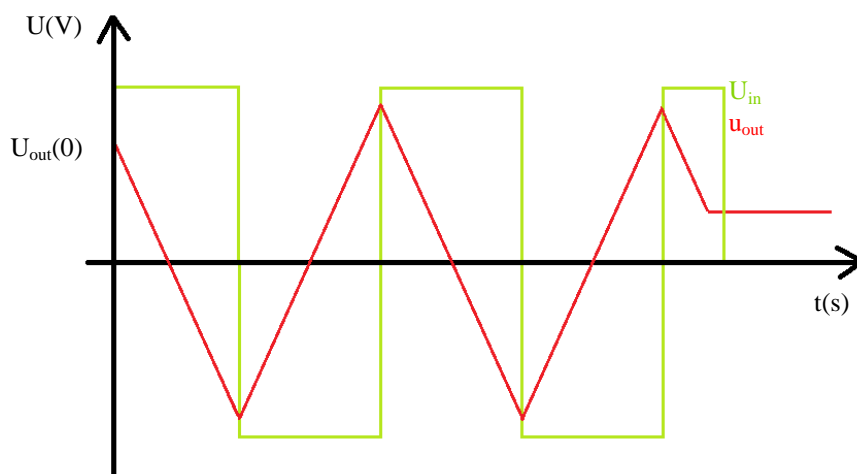
$$u_{out} = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^t U_{in} dt + U_{out}(0), \quad (2.1)$$

kde $u_{out}(V)$ je výstupní napětí integrátoru,
 $U_{in}(V)$ je vstupní napětí integrátoru a
 $R \cdot C(s)$ je časová konstanta integrátoru.

Je-li vstupní napětí kladné, výstupní napětí klesá.

Je-li vstupní napětí záporné, výstupní napětí stoupá.

Je-li vstupní napětí nulové, výstupní napětí zůstává na stejné úrovni, na jaké bylo doposud.



Obr. 2.2: Princip integrátoru [1]

Jak vyplývá z funkce integrátoru, mění se jeho výstupní napětí v závislosti na vstupním napětí a v závislosti na integrační časové konstantě $\tau=R \cdot C$. Tato konstanta svou velikostí určuje rychlost integrace. Čím větší má hodnotu, tím je integrace pomalejší a obráceně.

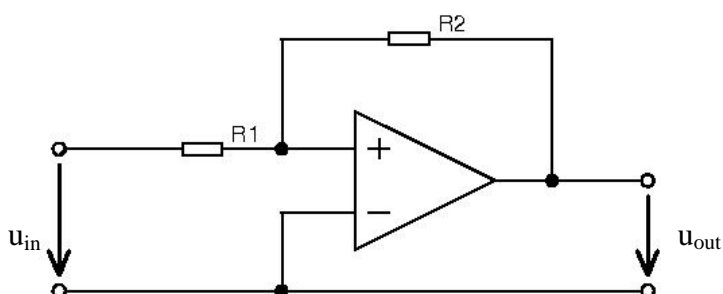
2.1.2 Komparátor

Komparátor je dalším z mnoha zapojení operačního zesilovače. Pracuje tak, že porovnává napětí na jednom ze svých vstupů s referenčním napětím na druhém ze svých vstupů a podle toho, zda je porovnávané napětí vyšší nebo nižší, než napětí referenční nastavuje své výstupní napětí do kladné saturace nebo do záporné saturace. Pro použití v převodníku je nutné použít komparátor s hysterezí (obr.2.3), aby bylo možné nastavení referenčního napětí.

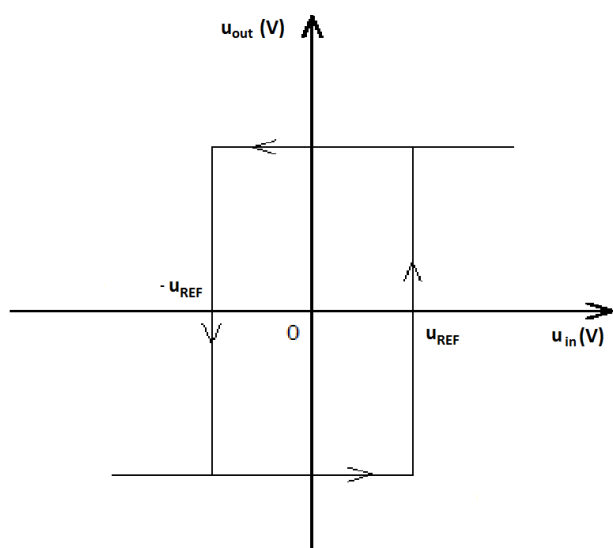
Komparátor s hysterezí se od klasického komparátoru liší tím, že se jeho výstupní napětí překlápí z kladné do záporné saturace při jiné úrovni vstupního napětí, než při jaké se překlápí ze záporné saturace do kladné saturace. Tento jev je znázorněn na obrázku 2.4. Napětí, při kterém se to děje, nazýváme referenčním napětím. Jeho hodnota se určí pomocí vztahu [1]

$$u_{REF} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{out}, \quad (2.2)$$

kde u_{REF} (V) je referenční napětí komparátoru,
 U_{out} (V) je saturační hodnota výstupního napětí a
 R_1 a R_2 (Ω) jsou hodnoty odporu rezistorů.



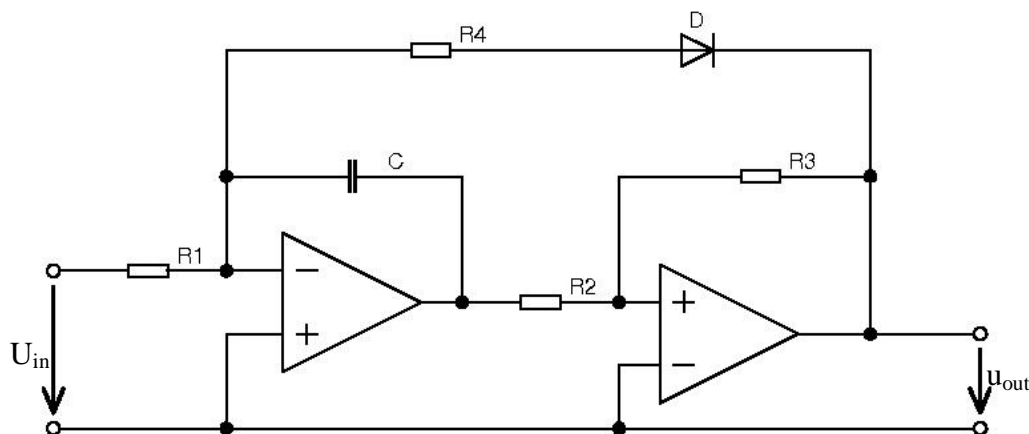
Obr. 2.3: Schéma zapojení komparátoru s hysterezí [1]



Obr. 2.4: Převodní charakteristika komparátoru s hysterezí [1]

2.1.3 Zapojení převodníku napětí na frekvenci sestaveného z diskretních součástek

Spojením integrátoru, komparátoru a přidáním zpětné vazby vznikne jednoduchý převodník napětí na frekvenci, jehož schéma je na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Schéma zapojení jednoduchého převodníku napětí na frekvenci [5]

2.1.4 Popis principu převodu napětí na frekvenci

Vstupní rezistor R_1 převádí vstupní napětí U_{in} na proud, který nabíjí integrační kondenzátor C . Jak napětí na tomto kondenzátoru vzrůstá, tak klesá výstupní napětí integrátoru. Jakmile tohle napětí klesne na rozhodovací úroveň komparátoru, která je dána vztahem 2.2, výstupní napětí komparátoru se nastaví na hodnotu záporné saturace. To způsobí otevření diody, přes níž se vybijí integrační kondenzátor. Rychlost, kterou se bude kondenzátor vybíjet lze ovládat velikostí vybíjecího proudu. Ten se nastavuje odporem rezistoru R_4 .

S vybíjením kondenzátoru stoupá výstupní napětí integrátoru. Jelikož je tohle napětí vyšší než rozhodovací úroveň komparátoru, nastaví se jeho výstupní napětí na hodnotu kladné saturace. Tím se dioda uzavře a kondenzátor se začne opět nabíjet.

2.1.5 Funkce jednotlivých prvků v zapojení

Rezistor R_1

Svou velikostí určuje, jak velký proud nabíjí integrační kondenzátor. To znamená, že určuje jak rychle se, při konstantním vstupním napětí a při stejné hodnotě integračního kondenzátoru, mění výstupní napětí integrátoru a komparátoru. To znamená, že má vliv na velikost frekvence výstupního signálu. Čím vyšší bude mít hodnotu, tím bude výstupní frekvence nižší.

Kondenzátor C

Svou velikostí určuje dobu, za jakou se při konstantním vstupním proudu, kondenzátor nabije na hodnotu, při které je výstupní napětí integrátoru na hodnotě, při níž se komparátor překlápí z kladné do záporné saturace a otevírá diodu. To znamená, že má vliv na velikost frekvence výstupního signálu. Čím vyšší bude mít hodnotu, tím bude výstupní frekvence nižší.

Rezistory R_2 a R_3

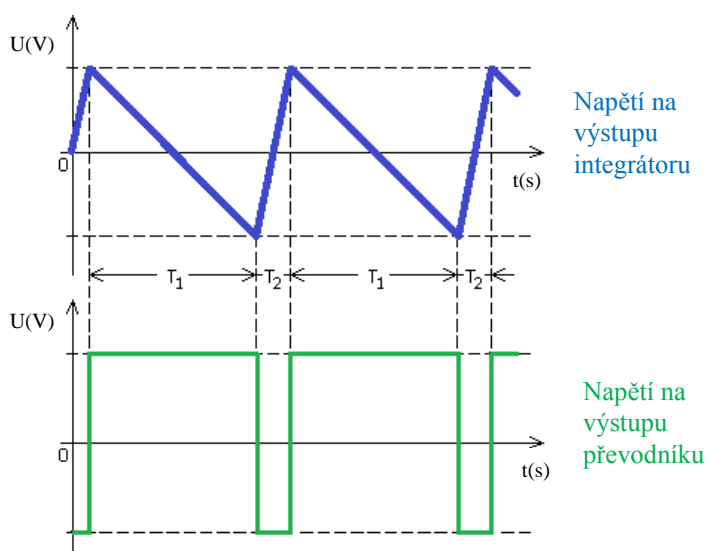
Svémi velikostmi, určují referenční napětí komparátoru. Tím vlastně určují dobu, po jakou se kondenzátor, bude muset nabíjet, než se komparátor překlápí z kladné do záporné saturace. Výstupní frekvence je na těchto prvcích závislá následovně. Čím je odpor rezistoru R_2 vyšší, tím je výstupní frekvence, stejně jako u rezistoru R_1 a kondenzátoru C , nižší. Kdežto u rezistoru R_3 je tomu přesně naopak. Čím vyšší hodnota odporu rezistoru R_3 , tím vyšší frekvence výstupního signálu.

Rezistor R_4

Svou velikostí určuje vybíjecí proud integračního kondenzátoru. Jak je uvedeno v následujících odstavcích, je v rámci zjednodušení vhodné volit hodnotu odporu tohoto rezistoru nižší, v řádech stovek Ohmů. Tím se dosáhne velice krátké doby vybíjení kondenzátoru, která se dá oproti době nabíjení kondenzátoru zanedbat. V tomto případě tedy nemá rezistor R_4 na výstupní frekvenci vliv.

Dioda D

Jedná se o rychlou Shottkyho diodu, která svým otevíráním a zavíráním řídí vybíjení integračního kondenzátoru. Je nutné použít Shottkyho diodu, kvůli její rychlosti, která je žádoucí. Tím že je dioda velmi rychlá, lze její dobu přechodu zanedbat a do převodu ji nemusíme započítávat.



Obr. 2.6: Detail časových průběhů v převodníku napět na frekvenci [5]

Zobrazený časový průběh na obrázku 2.6, znázorňuje výstupní napětí integrátoru (modrý průběh) a výstupní napětí celého převodníku U/f (zelený průběh). Oba tyto průběhy se dají rozložit na časové úseky T_1 a T_2 , kde doba T_1 je dána dobou nabíjení kondenzátoru a doba T_2 je dána dobou vybíjení kondenzátoru.

Doba T_1 je dána vztahem [5]

$$T_1 = \frac{2 \cdot U_{SAT} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C}{U_{in} \cdot R_3}, \quad (2.3)$$

kde $T_1(s)$ je doba nabíjení kondenzátoru,
 $U_{in} (V)$ vstupní napětí převodníku,
 $U_{SAT} (V)$ saturační napětí komparátoru a
 $R, C (\Omega, F)$ rezistory a kondenzátory.

Doba T_2 je dána vztahem [5]

$$T_2 = \frac{2 \cdot U_{SAT} \cdot R_2 \cdot C}{R_3 \cdot \left(\frac{U_{SAT}}{R_4} - \frac{U_{in}}{R_1} \right)}, \quad (2.4)$$

kde $T_2(s)$ je doba vybíjení kondenzátoru.

Výstupní frekvence je tedy dána vztahem [5]

$$f = \frac{1}{T_1} = \frac{U_{in} \cdot R_3}{2 \cdot U_{SAT} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C}, \quad (2.5)$$

kde $f (Hz)$ výstupní frekvence převodníku.

Převodní konstanta [5]

$$k = \frac{f}{U_{in}} = \frac{R_3}{2 \cdot U_{SAT} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C}. \quad (2.6)$$

2.1.6 Vzor výpočtu

S využitím vztahu 2.3, spočítáme dobu, po kterou se kondenzátor nabíjí, při vstupní napětí $U_{in}=15V$.

$$T_1 = \frac{2 \cdot U_{SAT} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C}{U_{in} \cdot R_3} = \frac{2 \cdot 11,61 \cdot 14760 \cdot 4700 \cdot 13,58 \cdot 10^{-9}}{15 \cdot 10940} = 133,302 \cdot 10^{-6} s = 133,302 \mu s.$$

S využitím vztahu 2.4, spočítáme dobu, po kterou se kondenzátor vybíjí, při vstupním napětí $U_{in}=15V$.

$$T_2 = \frac{2 \cdot U_{SAT} \cdot R_2 \cdot C}{R_3 \cdot \left(\frac{U_{SAT}}{R_4} - \frac{U_{in}}{R_1} \right)} = \frac{2 \cdot 11,61 \cdot 4,7 \cdot 10^3 \cdot 13,58 \cdot 10^{-9}}{10940 \cdot \left(\frac{11,61}{1 \cdot 10^2} - \frac{15}{14760} \right)} = 1,177 \cdot 10^{-6} = 1,177 \mu s.$$

S využitím vztahu 2.6, spočítáme převodní konstantu převodníku

$$k = \frac{f}{U_{in}} = \frac{R_3}{2 \cdot U_{SAT} \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C} = \frac{10940}{2 \cdot 11,61 \cdot 14760 \cdot 4,7 \cdot 10^3 \cdot 13,58 \cdot 10^{-9}} = 5000 \text{ Hz/V}$$

Ze vztahu 2.5 je patrné že je výstupní frekvence počítána pouze z doby nabíjení kondenzátoru, tedy z doby T_1 . Kdybychom chtěli počítat výstupní frekvenci z obou časových úseků, nabíjení a vybíjení kondenzátoru, dosáhli bychom podle vztahu pro výpočet frekvence z periody hodnoty

$$f_{out1} = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{1}{133,302 \cdot 10^{-6} + 1,177 \cdot 10^{-6}} = 7436,105 \text{ Hz}.$$

V případě, že bychom počítali výstupní frekvenci pouze z doby nabíjení kondenzátoru, tedy z doby podle vztahu 2.5, dostali bychom hodnotu

$$f_{out2} = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{133,302 \cdot 10^{-6}} = 7501,763 \text{ Hz}.$$

Jak tedy vidíme, je rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami velice malý, jeho odchylka je rovna

$$\delta f_{out} = \frac{f_{out2} - f_{out1}}{f_{out2}} \cdot 100 = \frac{7501,763 - 7436,105}{7436,105} \cdot 100 = 8,83 \cdot 10^{-3} \% = 0,0088 \%.$$

Tímto je dokázáno, že doba vybíjení kondenzátoru je oproti době nabíjení kondenzátoru opravdu velmi malá, a že pro zjednodušení výpočtu lze používat vztah 2.5.

2.2 Simulace obvodu a její výsledky

2.2.1 Výsledky simulace

Simulace obvodu byla prováděna v programu PSpice z balíčku programů Orcad.

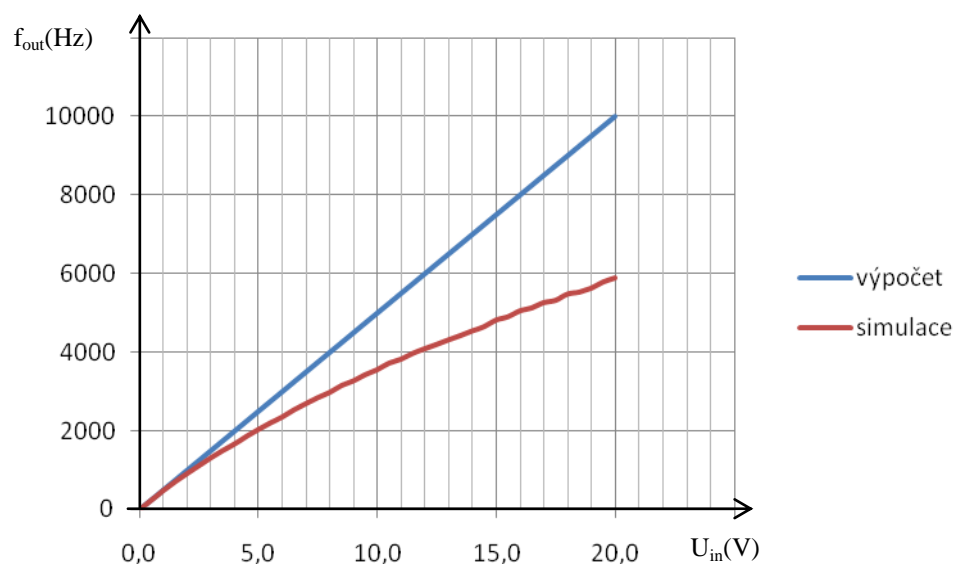
V obvodu byly použity součástky s hodnotami uvedenými v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Hodnoty součástek použitých v zapojení převodníku napětí na frekvenci

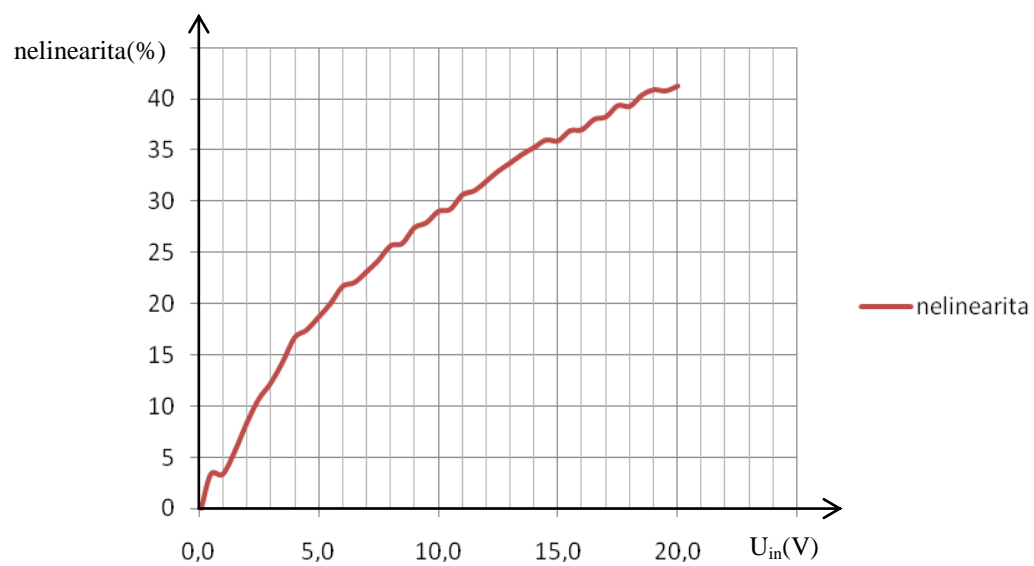
Součástka	Hodnota
R_1	14760Ω
R_2	4,7kΩ
R_3	10940Ω
R_4	100Ω
C	13,58nF
D	BAT85
OZ	LM741

Tab. 2.2: Výsledky simulace převodu napětí na frekvenci, $f_{\max}=10\text{kHz}$

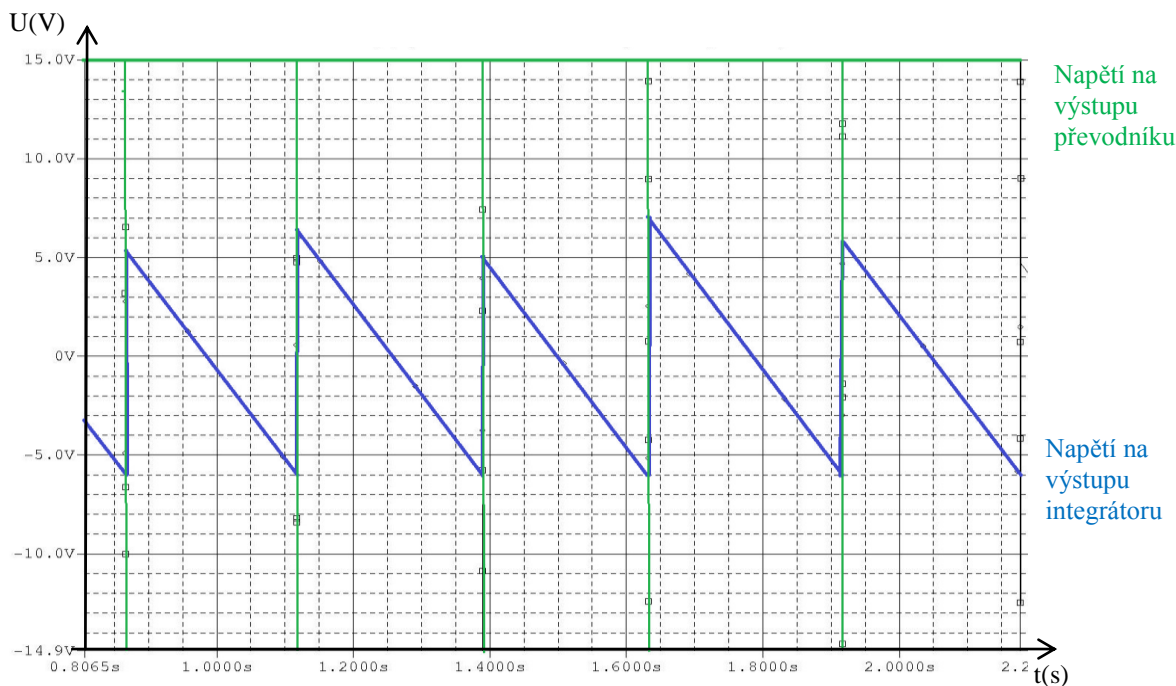
Vstupní napětí (V)	Výstupní frekvence (Hz)	Vypočítaná výstupní frekvence (Hz)	Nelinearita převodu (%)
0,1	50,00	50	0,00
0,5	241,68	250	3,33
1,0	483,35	500	3,33
1,5	708,30	750	5,56
2,0	916,70	1000	8,33
2,5	1116,63	1250	10,67
3,0	1316,70	1500	12,22
3,5	1499,93	1750	14,29
4,0	1666,60	2000	16,67
4,5	1858,28	2250	17,41
5,0	2033,25	2500	18,67
5,5	2200,00	2750	20,00
6,0	2349,90	3000	21,67
6,5	2533,38	3250	22,05
7,0	2691,50	3500	23,10
7,5	2841,75	3750	24,22
8,0	2974,80	4000	25,63
8,5	3150,10	4250	25,88
9,0	3266,55	4500	27,41
9,5	3425,23	4750	27,89
10,0	3550,00	5000	29,00
10,5	3716,48	5250	29,21
11,0	3816,45	5500	30,61
11,5	3966,93	5750	31,01
12,0	4083,60	6000	31,94
12,5	4191,88	6250	32,93
13,0	4308,20	6500	33,72
13,5	4416,53	6750	34,57
14,0	4533,20	7000	35,24
14,5	4641,45	7250	35,98
15,0	4808,25	7500	35,89
15,5	4891,80	7750	36,88
16,0	5041,60	8000	36,98
16,5	5116,65	8250	37,98
17,0	5249,60	8500	38,24
17,5	5308,63	8750	39,33
18,0	5466,60	9000	39,26
18,5	5516,70	9250	40,36
19,0	5616,40	9500	40,88
19,5	5774,93	9750	40,77
20,0	5875,00	10000	41,25



Obr. 2.7: Převodní charakteristika, zhotovená z výsledků simulace



Obr. 2.8: Závislost nelinearity převodu na vstupním napětí při simulaci



Obr. 2.9: Časové průběhy napětí v převodníku napětí na frekvenci, při $U_{in}=11V$

2.2.2 Zhodnocení výsledků simulace

Převodní charakteristika

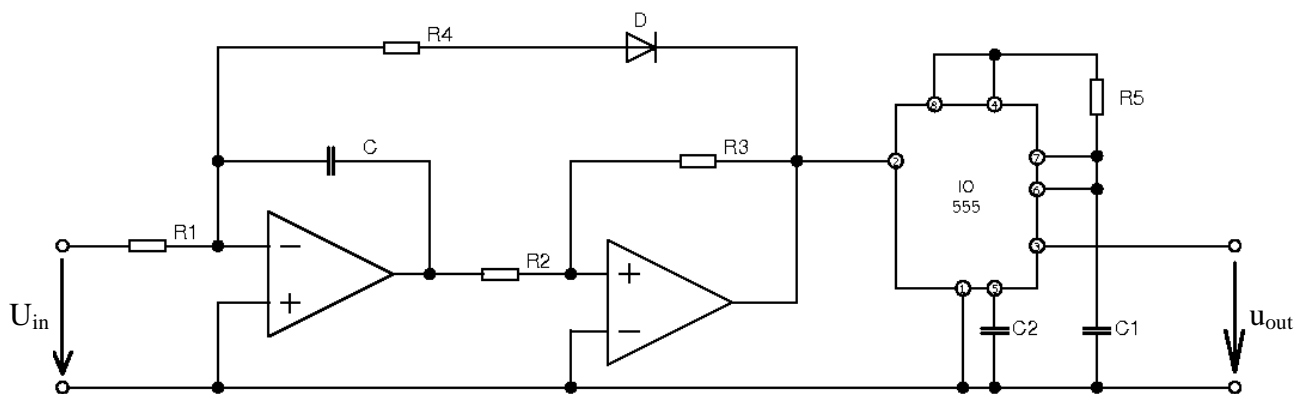
Z obrázku 2.7 je patrné, že naměřená převodní charakteristika se nepřekrývá s ideální, vypočítanou, převodní charakteristikou, tak jak by tomu mělo být v ideálním případě. Na plném rozsahu, 10kHz, je rozdíl výstupních frekvencí větší než 4kHz.

Nelinearita převodu

Na obrázku 2.8 je naznačena závislost nelinearity na vstupním napětí. Nelinearita převodu je na plném rozsahu 41,25%. Tato nelinearita je velmi vysoká a vzhledem k tomu, že při simulaci jsou použity přesné součástky, je její hodnota také docela překvapivá.

2.3 Výsledky měření obvodu

Při měření byl stávající obvod, obr 2.5, doplněn o integrovaný obvod 555, který v zapojení plní funkci generátoru pulzů. Celý obvod byl sestaven na nepájivém kontaktním poli podle schématu na obrázku 2.10. Měření bylo provedeno pro několik rozsahů výstupní frekvence. V práci je uveden ovšem pouze rozsah 10kHz. Při tomto rozsahu bylo dosaženo, na poměry tohoto převodníku, relativně dobrých výsledků.



Obr. 2.10: Schéma zapojení převodníku, doplněné o obvod 555

Integrovaný obvod 555

V zapojení je použit integrovaný obvod 555 v monostabilním režimu. To znamená, že obvod po příchodu spouštěcího pulzu, vygeneruje výstupní pulz o požadované délce. Po uplynutí tohoto pulzu obvod čeká na další spouštěcí pulz.

Pro výpočet hodnot odporu rezistoru R_5 a kapacit kondenzátoru C_1 platí vztah

$$T = 1,1 \cdot R \cdot C, \quad (2.7)$$

kde $T(s)$ je doba trvání výstupního pulzu,
 $R, C (\Omega, F)$ hodnota odporu rezistoru a kapacity kondenzátoru.

Hodnota odporu rezistoru se volí v rozmezích $1k\Omega$ až $1M\Omega$, a hodnota kapacity kondenzátoru se dopočítá. Měla by být v rozsahu $1nF$ až $220\mu F$ [3]. Kapacita kondenzátoru C_2 se volí z rozsahu $10nF$ až $100nF$ [3].

2.3.1 Výsledky měření

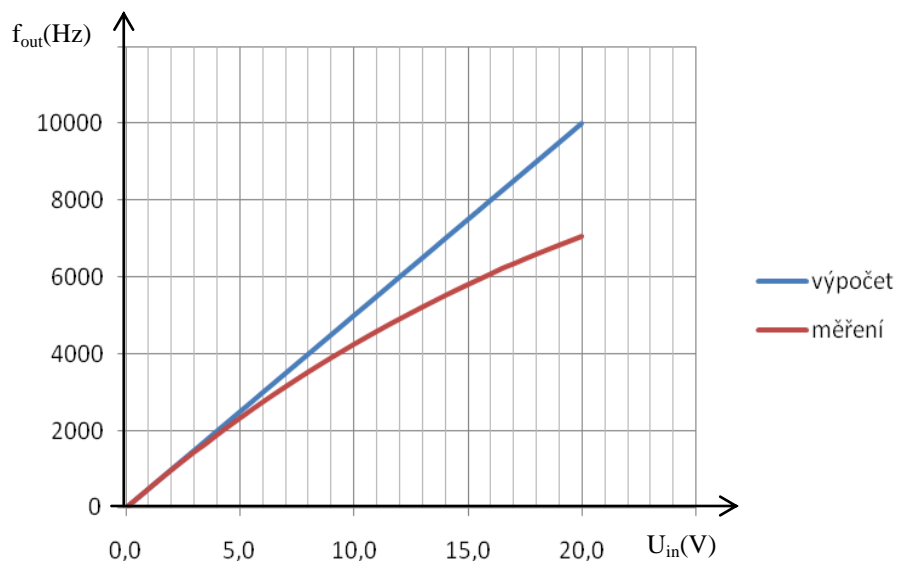
Tab. 2.3: Hodnoty součástek použité při měření obvodu

Součástka	Hodnota
R_1	14760Ω
R_2	$4,7k\Omega$
R_3	10940Ω
R_4	100Ω
R_5	$1k\Omega$
C	$13,58nF$
C_1	$20nF$
C_2	$10nF$
D	BAT85
OZ	LM741

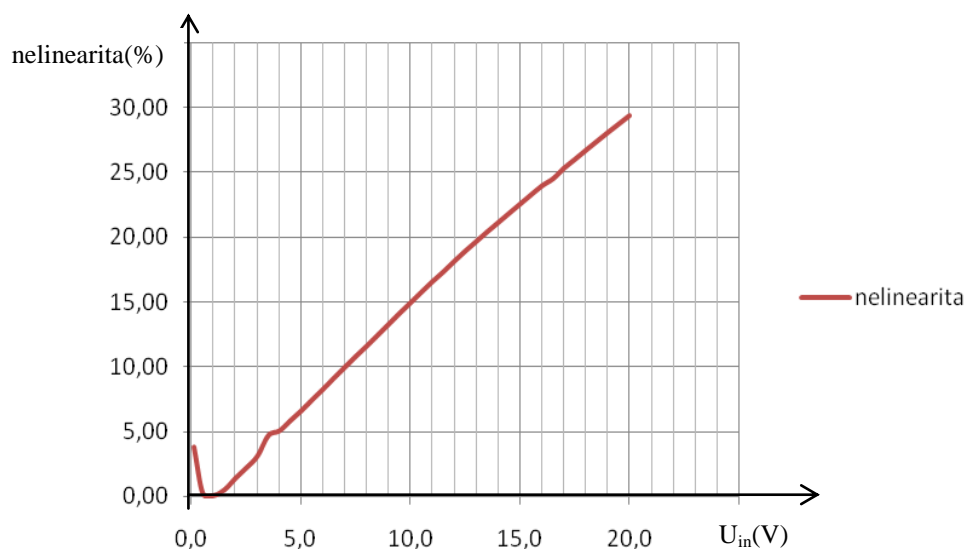
Hodnoty součástek byly zvoleny takto, aby bylo možné mít výstupní signál s frekvencí přibližně $2kHz$ se střídou 4:1.

Tab. 2.4: Převodní charakteristika

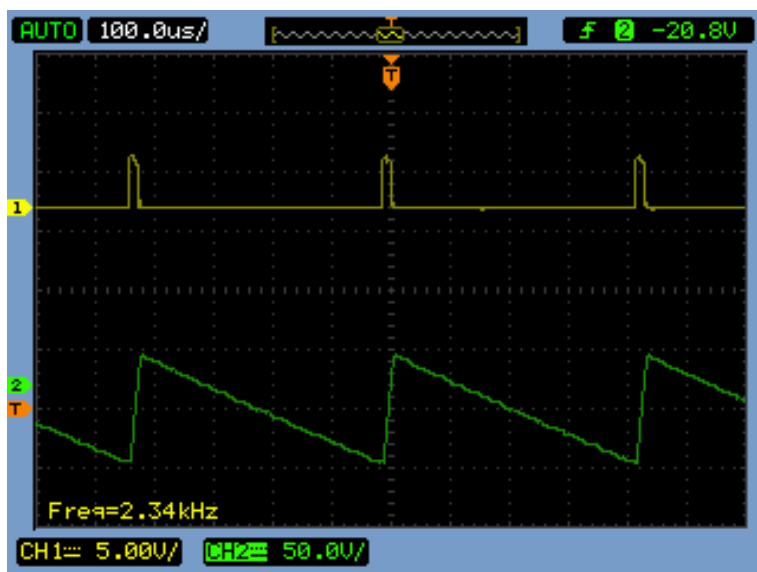
Vstupní napětí (V)	Výstupní frekvence (Hz)	Vypočítaná výstupní frekvence (Hz)	Nelinearita převodu (%)
0,1	48,10	50	3,80
0,5	249,43	250	0,23
1,0	500,25	500	0,05
1,5	746,20	750	0,51
2,0	986,09	1000	1,39
2,5	1222,47	1250	2,20
3,0	1453,54	1500	3,10
3,5	1667,90	1750	4,69
4,0	1899,10	2000	5,05
4,5	2119,00	2250	5,82
5,0	2335,24	2500	6,59
5,5	2545,35	2750	7,44
6,0	2752,12	3000	8,26
6,5	2953,33	3250	9,13
7,0	3151,05	3500	9,97
7,5	3345,00	3750	10,80
8,0	3535,85	4000	11,60
8,5	3721,40	4250	12,44
9,0	3902,19	4500	13,28
9,5	4079,01	4750	14,13
10,0	4253,05	5000	14,94
10,5	4422,22	5250	15,77
11,0	4588,45	5500	16,57
11,5	4753,40	5750	17,33
12,0	4911,00	6000	18,15
12,5	5067,14	6250	18,93
13,0	5221,52	6500	19,67
13,5	5372,12	6750	20,41
14,0	5521,58	7000	21,12
14,5	5666,31	7250	21,84
15,0	5808,55	7500	22,55
15,5	5947,10	7750	23,26
16,0	6083,24	8000	23,96
16,5	6229,12	8250	24,50
17,0	6348,22	8500	25,32
17,5	6475,53	8750	25,99
18,0	6597,46	9000	26,69
18,5	6717,15	9250	27,38
19,0	6834,10	9500	28,06
19,5	6949,42	9750	28,72
20,0	7062,23	10000	29,38



Obr. 2.11: Naměřená převodní charakteristika



Obr. 2.12: Nelinearita převodu



Obr. 2.13: Časové průběhy napětí v převodníku

2.3.2 Shrnutí výsledků měření

Převodní charakteristika

Z obrázku 2.11 lze odečíst, že se naměřená převodní charakteristika od ideální převodní charakteristiky v závislosti na napětí odchyľuje více a více. Na plném rozsahu je rozdíl výstupní frekvence ideální a naměřené téměř 3kHz, což je na rozsahu 10kHz 30% odchylka.

Nelinearita převodu

To, že je převod nelineární lze vidět již z grafu 2.11. Jak nelinearita narůstá v závislosti na vstupním napětí je zachyceno v grafu na obrázku 2.12. Nelinearita převodu, která na plném rozsahu činí, jak je naznačeno i v předchozím odstavci, téměř 30%, činí tento převodník nepoužitelným v praxi. Pro účely pochopení principu převodu je však dostačující.

Časové parametry výstupního signálu

Díky použití generátoru pulzů, který je závislý pouze na spouštěcím signálu, jsou všechny časové parametry výstupního signálu konstantní. Doba náběžné hrany pulzu výstupního signálu má na celém rozsahu výstupní frekvence konstantní hodnotu 2 μ s. Stejnou hodnotu má také sestupná hrana pulzu výstupního signálu. Doba trvání výstupního pulzu má také konstantní hodnotu na celém rozsahu výstupní frekvence. Podle vztahu 2.7, by ovšem měla být doba trvání výstupního pulzu 22 μ s, naměřená hodnota však byla 16 μ s na celém rozsahu výstupní frekvence.

2.3.3 Porovnání měření a simulace

Hlavním parametrem, který lze porovnávat je nelinearita převodu. Teoreticky by měla být nelinearita při měření, díky nedokonalostem součástek, vyšší než při simulaci. V tomto případě ovšem tento předpoklad neplatí. Při simulaci bylo dosaženo nelinearity přibližně 40%, přičemž při měření obvodu byla nelinearita téměř o 10% nižší.

Časové parametry simulace a měření nelze porovnávat, protože při simulaci, která byla prováděna v rámci semestrálního projektu, není v obvodu zapojen generátor pulzů, jako je tomu u měření.

3.1.1 Generátor jednotlivých pulzů

Požadavkem na tento obvod je generace pulzů o dané délce, a to právě tehdy, když na jeho vstup přijde impuls od komparátoru. Délka jednoho generovaného pulzu je dána pouze kapacitou kondenzátoru C_{OS} , podle vztahu [2]

$$t_{OS} = C_{OS} \cdot 6,8 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^{-7}, \quad (3.1)$$

kde t_{OS} (s) je doba trvání jednoho pulzu a
 C_{OS} (F) je kapacita časovacího kondenzátoru.

Dalším požadavkem na generátor jednotlivých pulzů v tomto obvodu je, aby svým výstupním napětím řídil spínač S_1 a tím určoval délku integrovací a resetovací fáze. Tyto dva pojmy jsou podrobněji rozebrány v následujících odstavcích.

3.2 Princip převodu U/f u obvodu AD650:

Celý proces převodu napětí na frekvenci, se u integrovaného obvodu AD650 skládá ze dvou fází. Těmi jsou, tzv. integrovací fáze a resetovací fáze.

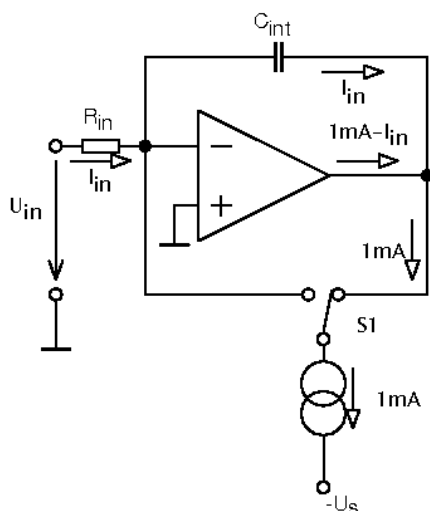
3.2.1 Integrovací fáze

Vstupní napětí U_{in} je převedeno na vstupním rezistoru R_{in} na proud I_{in} , který nabíjí integrační kondenzátor C_{int} . Jak roste napětí na kondenzátoru, klesá výstupní napětí integrátoru. V okamžiku, kdy tohle napětí protne rozhodovací úroveň komparátoru (-0,6V), se na výstupu komparátoru objeví maximální vstupní napětí, které spouští generování jednoho pulzu v generátoru. Tento pulz má logickou hodnotu 1 a přepíná spínač S_1 do polohy zobrazené na obrázku 3.4. V tento moment nastává resetovací fáze. Je nutné ještě podotknouti, že během celé integrovací fáze, která trvá dobu T_1 , je spínač S_1 v poloze zakreslení na obrázku 3.3.

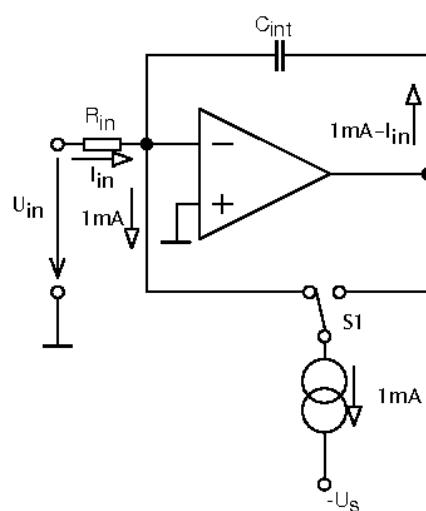
Dobu integrace si můžeme jednoduše spočítat pomocí vztahu [2]

$$T_1 = t_{OS} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^{-3}}{I_{in}} - 1 \right), \quad (3.2)$$

kde T_1 (s) je doba trvání integrovací fáze,
 t_{OS} (s) je doba trvání jednoho pulzu a
 I_{in} (A) je vstupní proud převodníku.



Obr. 3.3: Integrovaní fáze

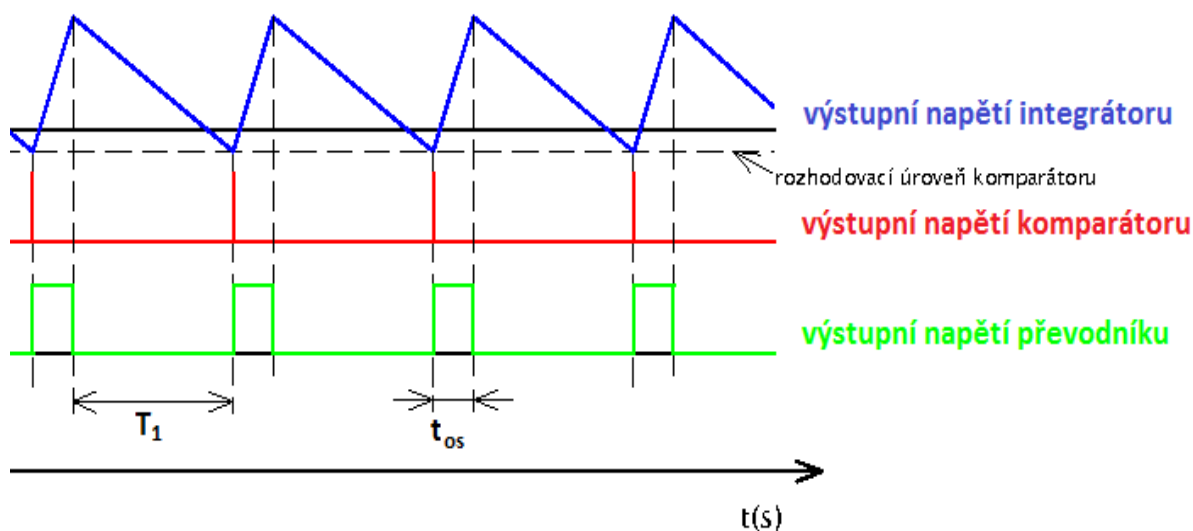


Obr. 3.4: Resetovací fáze

3.2.2 Resetovací fáze

Jak již bylo řečeno v předchozím odstavci, je spínač S_1 přepnut do polohy znázorněné na obrázku 3.4 a výstup generátoru pulzu je v logické hodnotě 1. Kondenzátor C_{int} se vybíjí proudem $1\text{mA} - I_{in}$ přes integrovaný zdroj proudu do záporné napájecí svorky. Podobně jako v případě integrovací fáze, napětí na kondenzátoru klesá, a napětí na výstupu integrátoru roste. Tohle se děje přesně po dobu t_{os} (doba jednoho pulzu výstupního signálu). Za tuto dobu je kondenzátor C_{int} vybit na určitou hodnotu. Po uplynutí doby t_{os} se spínač S_1 přepne zpět do polohy, která je znázorněna na obrázku 3.3 a začne opět integrovací fáze.

Pro ilustraci uvedeného, jsou na obrázku 3.5, znázorněny časové průběhy napětí v obvodu AD650.



Obr. 3.5: Časové průběhy napětí v obvodu AD650

Výstupní frekvence převodníku je dána vztahem [2]

$$f_{out} = \frac{U_{in}}{R_{in} \cdot t_{os} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}, \quad (3.3)$$

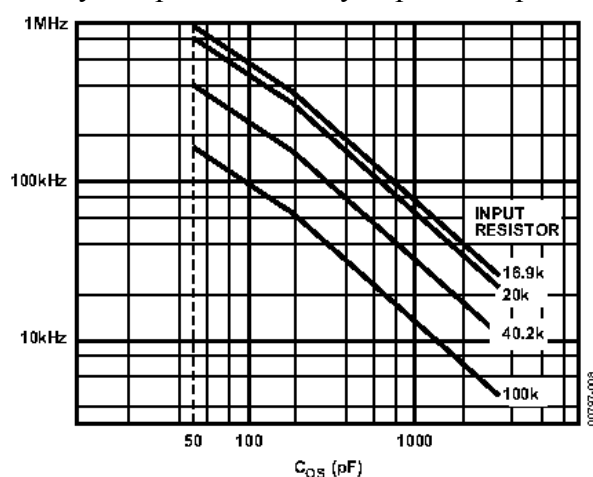
kde $f_{out}(\text{Hz})$ je výstupní frekvence převodníku,
 $U_{in}(\text{V})$ je vstupní napětí,
 $R_{in}(\Omega)$ je odpor vstupního rezistoru a
 $t_{os}(\text{s})$ je doba trvání jednoho pulzu.

Převodní konstanta je dána vztahem

$$k = \frac{f_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{R_{in} \cdot t_{os} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}. \quad (3.4)$$

3.2.3 Výběr externích součástek k převodníku

Pro výběr správné hodnoty odporu vstupního odporu je nutné brát ohled na obrázek 3.6.



Obr. 3.6: Graf závislosti hodnoty odporu vstupního rezistoru na zvolené kapacitě kondenzátoru C_{os} a rozsahu výstupní frekvence f_{out} [2]

Hodnota kapacity integračního kondenzátoru C_{int} se spočítá podle vztahu [2]

$$C_{int} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{f_{MAX}}, \quad (3.5)$$

kde $C_{int}(\text{F})$ je hodnota kapacity integračního kondenzátoru a
 $f_{MAX}(\text{Hz})$ je maximální hodnota výstupní frekvence.

Hodnota odporu vstupního rezistoru se spočítá podle vztahu

$$R_{in} = \frac{U_{in\max}}{f_{out} \cdot t_{os} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}, \quad (3.6)$$

kde $U_{in\max}(\text{V})$ je maximální hodnota vstupního napětí. V našem případě se jedná o hodnotu 10V.

Poslední součástí, která je v zapojení potřeba je výstupní rezistor. Tento rezistor má za úkol omezovat proud přes výstupní tranzistor, který by neměl překračovat $8mA$.

Hodnota odporu výstupního rezistoru se spočítá podle vztahu

$$R_2 = \frac{U_{Logic}}{I_{OUTMAX}}, \quad (3.7)$$

kde $R_2(\Omega)$ je odpor výstupního rezistoru,
 $U_{Logic}(V)$ je napětí zvolené logiky a
 $I_{OUTMAX}(A)$ je maximální výstupní proud, který může téci přes výstupní tranzistor.

3.2.4 Vzor výpočtu

Rozsah výstupní frekvence je, za předpokladu konstantního vstupního napětí, určen pouze dvěma součástkami a to hodnotou odporu vstupního rezistoru R_{in} a hodnotou kapacity kondenzátoru C_{os} . Kondenzátor C_{int} nemá na výstupní frekvenci žádný vliv.

Hodnoty kapacity kondenzátoru a odporu vstupního rezistoru, byly voleny s ohledem na obrázek 3.6, poté byly pro měření mírně upraveny, aby byl převod co nejpřesnější.

Jako první je potřeba spočítat s využitím vztahu 3.1 dobu trvání jednoho pulzu. Předpokládáme, výstupní frekvenci v rozsahu 1MHz. Tomu odpovídá kapacita kondenzátoru $C_{os}=50pF$.

$$t_{os} = C_{os} \cdot 6,8 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^{-7} = 50 \cdot 10^{-12} \cdot 6,8 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^{-7} s = 6,4 \cdot 10^{-7} s = 0,64 \mu s$$

Dalším parametrem, který je nutné spočítat, je hodnota odporu vstupního rezistoru. Jeho hrubá hodnota je odečtena, podobně jako hodnota časovacího kondenzátoru z grafu na obrázku 3.6. Hodnota vstupního odporu by se měla v tomto případě pohybovat okolo $17k\Omega$. Její přesná hodnota se spočítá dosazením do vztahu 3.6.

$$R_{in} = \frac{U_{inmax}}{f_{out} \cdot t_{os} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = \frac{10}{1 \cdot 10^6 \cdot 6,4 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \Omega = 15625 \Omega$$

Z těchto dvou vypočítaných hodnot, je nyní možné vypočítat hodnotu výstupní frekvence. Budeme uvažovat vstupní napětí $U_{in}=8V$.

$$f_{out} = \frac{\frac{U_{in}}{R_{in}}}{t_{os} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = \frac{\frac{8}{15625}}{6,4 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} Hz = 8 \cdot 10^5 Hz = 800 kHz$$

S využitím vztahu 3.4 se určí převodní konstanta převodníku.

$$k = \frac{f_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{R_{in} \cdot t_{os} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{15625 \cdot 6,4 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 100000 Hz/V$$

Další parametr, který vychází z hodnoty vstupního odporu a doby trvání jednoho pulzu je doba integrace. Její velikost, pro vstupní napětí stejné jako v předcházejícím případě tedy $U_{in}=8V$, se vypočítá s využitím vztahu 3.2.

$$T_1 = t_{os} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^{-3}}{I_{in}} - 1 \right) = t_{os} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^{-3}}{\frac{U_{in}}{R_{in}}} - 1 \right) = 6,4 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^{-3}}{\frac{8}{15625}} - 1 \right) s = 6,1 \cdot 10^{-7} s = 0,61 \mu s$$

Aby byl obvod připraven k zapojení podle schématu na obrázku 3.1, je potřeba vypočítat poslední dvě externí součástky. Těmi jsou integrační kondenzátor a výstupní rezistor.

Hodnotu kapacity integračního kondenzátoru C_{int} vypočítáme s pomocí vztahu 3.5.

$$C_{int} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{f_{MAX}} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^6} F = 1 \cdot 10^{-10} F = 100 pF$$

V tomto případě se ovšem musí zvolit hodnota $C_{int}=1nF$, protože právě tato hodnota je nejnižší dovolená. Proto také vztah 3.5 platí pouze tehdy, vyjde-li kapacita alespoň $1nF$. [2]

Hodnota odporu výstupního rezistoru se vypočítá jednoduše ze vztahu 3.7. Při uvažování výstupního signálu v logice TTL, tzn. $U_{Logic}=5V$.

$$R_2 = \frac{U_{Logic}}{I_{OUTMAX}} = \frac{5}{8 \cdot 10^{-3}} \Omega = 625 \Omega.$$

Tab. 3.1: Hodnoty součástek pro nastavení požadovaného rozsahu výstupní frekvence

Maximální výstupní frekvence	C_{os}	C_{int}	R_{in}
10kHz	1000pF	10nF	140,85k Ω
100kHz	620pF	1nF	22,14k Ω
500kHz	100pF	1nF	20,41k Ω
1MHz	50pF	1nF	15,63k Ω

Hodnoty součástek uvedené v tabulce 3.1 byly použity při simulaci, jejíž výsledky jsou uvedeny v následující části kapitoly. Pro měření byly použity jiné hodnoty součástek.

V tabulce 3.2 jsou uvedeny katalogové hodnoty nelinearity převodu. S těmito hodnotami jsou v dalších částech kapitoly porovnávány naměřené hodnoty a hodnoty zjištěné simulací.

Tab. 3.2: Katalogové hodnoty nelinearity převodu napětí na frekvenci [2]

Maximální výstupní frekvence	Nelinearita	
	typická	Maximální
10kHz	0,002 %	0,005%
100kHz	0,005%	0,02%
500kHz	0,02%	0,05%
1MHz	0,05%	0,1%

3.3 Výsledky simulace převodníku s integrovaným obvodem AD650

Tato část kapitoly obsahuje výsledky simulací navrženého převodníku s integrovaným obvodem AD650 jehož schéma je na obrázku 3.1. Je rozdělena na 4 části podle rozsahu výstupní frekvence převodníku. Všechny tyto části jsou obsahově shodné. U každého z rozsahů je uvedena převodní charakteristika, časové parametry výstupního signálu, hodnoty externích součástek, pomocí nichž se nastavuje rozsah výstupní frekvence, a grafické zpracování těchto výsledků.

3.3.1 Simulace převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=10\text{kHz}$

Tab. 3.3: Převodní charakteristika, $f_{\max}=10\text{kHz}$

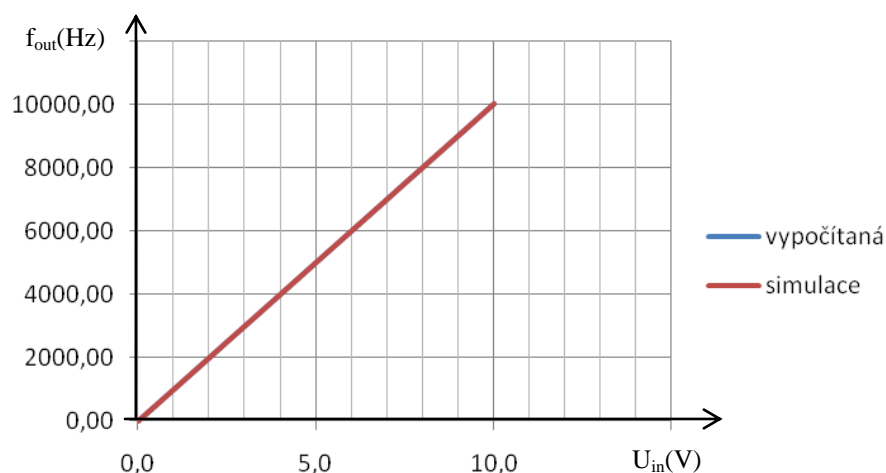
Vstupní napětí U_{in}	Výstupní frekvence změřená f_{out}	Výstupní frekvence vypočítaná f_{out}	Nelinearita převodu
(V)	(Hz)	(Hz)	(%)
0,0	0,00	0	-----
0,5	500,01	500	0,002
1,0	1000,01	1000	0,001
1,5	1500,01	1500	0,000
2,0	1999,99	2000	0,000
2,5	2500,08	2500	0,003
3,0	3000,09	3000	0,003
3,5	3499,89	3500	0,003
4,0	4000,01	4000	0,000
4,5	4499,90	4500	0,002
5,0	4999,98	5000	0,000
5,5	5500,19	5500	0,003
6,0	5999,74	6000	0,004
6,5	6500,30	6500	0,005
7,0	7000,27	7000	0,004
7,5	7499,89	7500	0,001
8,0	7999,87	8000	0,002
8,5	8500,19	8500	0,002
9,0	9000,09	9000	0,001
9,5	9500,07	9500	0,001
10,0	9999,80	10000	0,002

Tab. 3.4: Časové parametry výstupního signálu, $f_{\max}=10\text{kHz}$

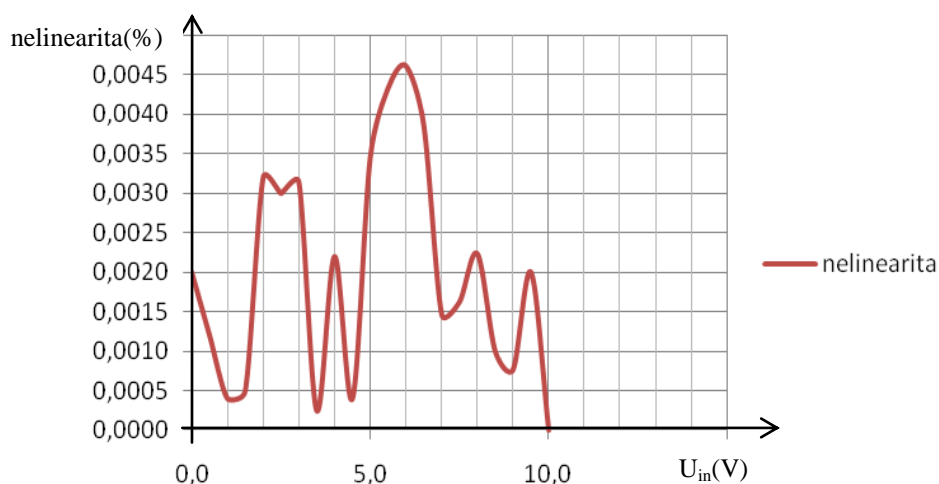
Vstupní napětí U_{in}	Doba pulzu	Doba nástupné hrany	Doba sestupné hrany
(V)	(μs)	(ns)	(ns)
0,0 – 10,0	7,1	160	60

Tab. 3.5: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{\max}=10\text{kHz}$

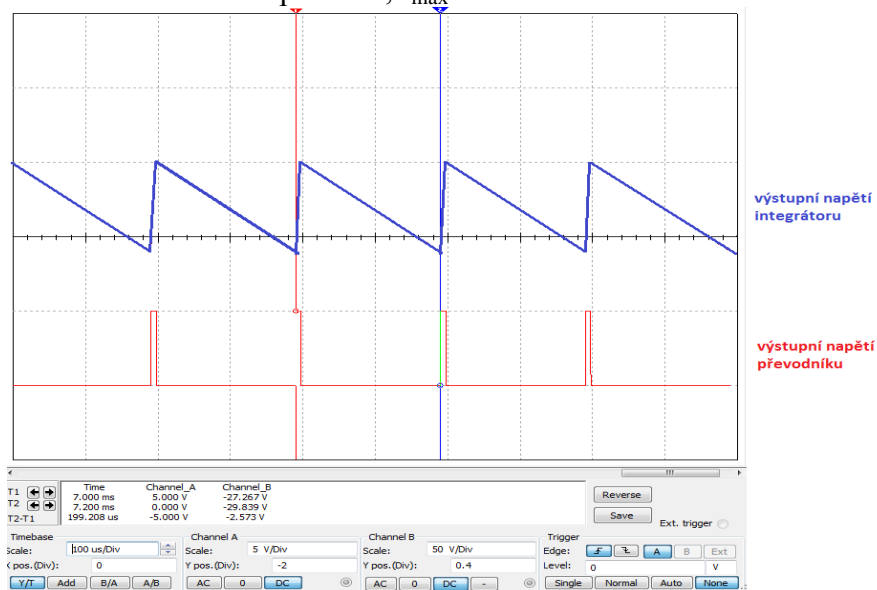
R_{in}	C_{os}	C_{int}
140,85k Ω	1nF	10nF



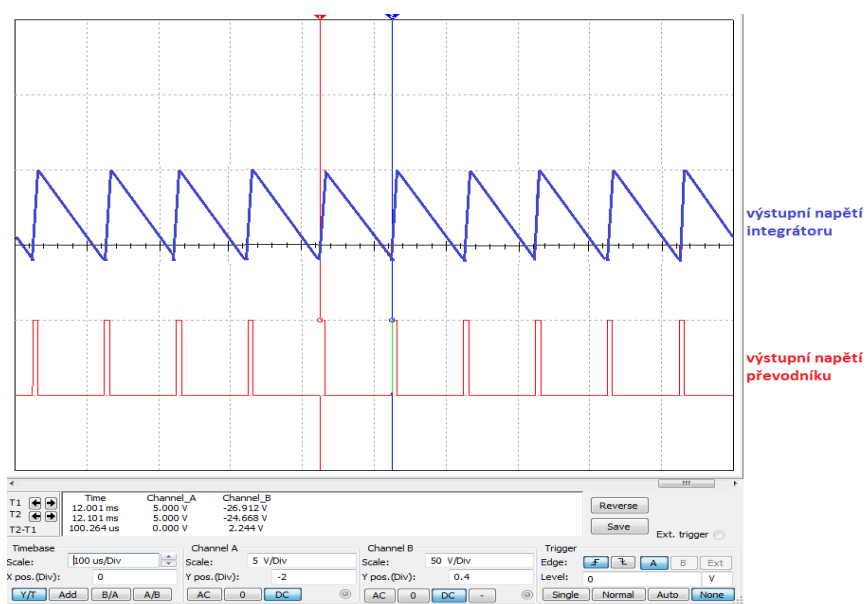
Obr. 3.7: Převodní charakteristika, $f_{\max}=10\text{kHz}$



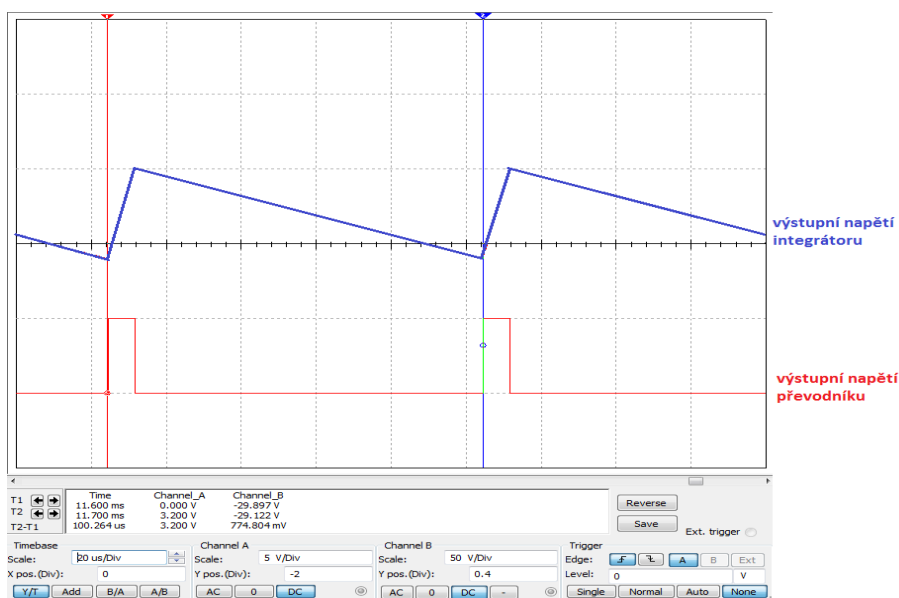
Obr. 3.8: Nelinearita převodu, $f_{\max}=10\text{kHz}$



Obr. 3.9: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=5\text{kHz}$



Obr. 3.10: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=10\text{kHz}$



Obr. 3.11: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{out}=10\text{kHz}$

3.3.2 Simulace převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=100\text{kHz}$

Tab. 3.6: Převodní charakteristika, $f_{\max}=100\text{kHz}$

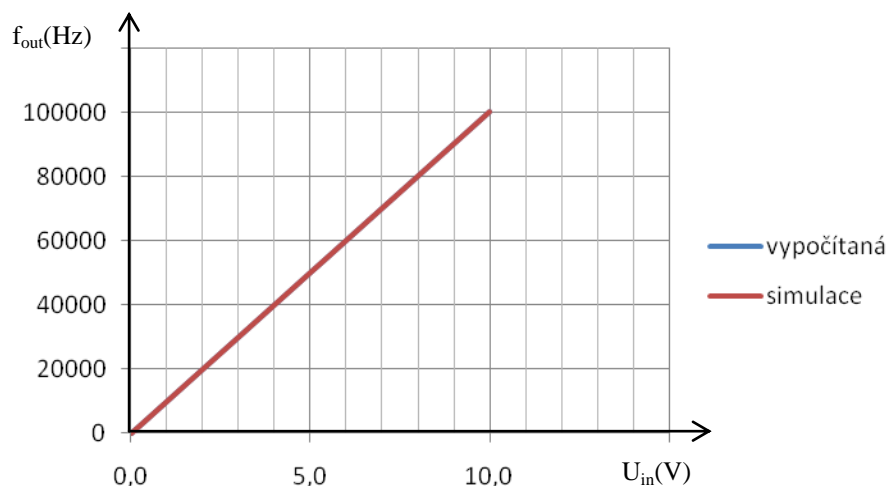
Vstupní napětí U_{in}	Výstupní frekvence změřená f_{out}	Výstupní frekvence vypočítaná f_{out}	Nelinearita převodu
(V)	(Hz)	(Hz)	(%)
0,0	0,00	0	-----
0,5	4999,75	5000	0,002
1,0	10000,41	10000	0,001
1,5	14999,10	15000	0,000
2,0	19999,23	20000	0,000
2,5	24998,00	25000	0,003
3,0	30001,70	30000	0,003
3,5	34999,38	35000	0,003
4,0	39997,00	40000	0,000
4,5	44998,94	45000	0,002
5,0	50001,87	50000	0,000
5,5	54998,87	55000	0,003
6,0	59989,72	60000	0,004
6,5	64987,98	65000	0,005
7,0	70001,54	70000	0,004
7,5	74989,00	75000	0,001
8,0	80000,87	80000	0,002
8,5	84983,00	85000	0,002
9,0	89998,93	90000	0,001
9,5	95000,10	95000	0,001
10,0	99998,01	100000	0,002

Tab. 3.7: Časové parametry výstupního signálu, $f_{\max}=100\text{kHz}$

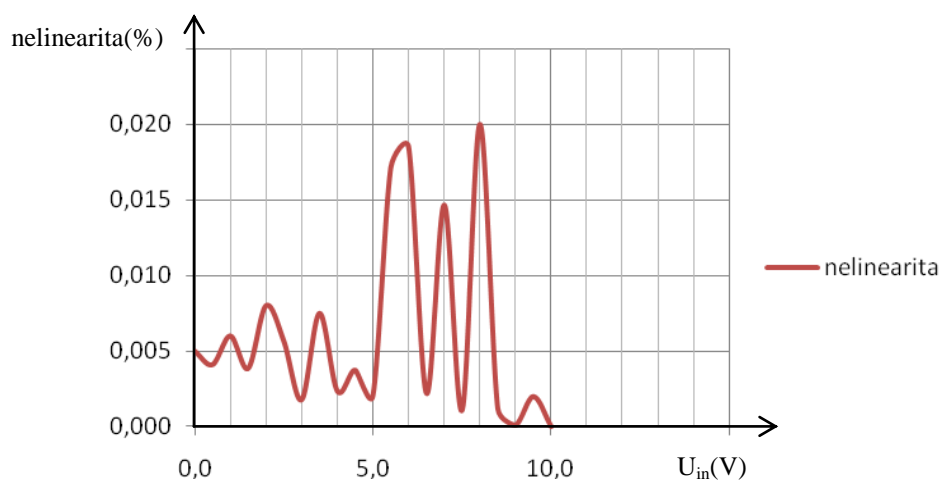
Vstupní napětí U_{in}	Doba pulzu	Doba nástupné hrany	Doba sestupné hrany
(V)	(μs)	(ns)	(ns)
0,0 – 10,0	4,516	160	60

Tab. 3.8: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{\max}=10\text{kHz}$

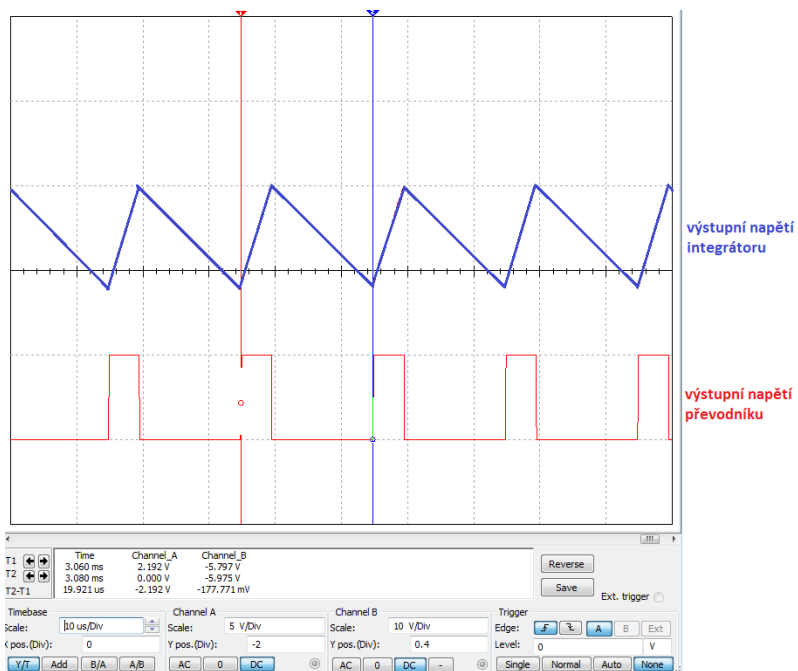
R_{in}	C_{os}	C_{int}
22,14k Ω	620pF	1nF



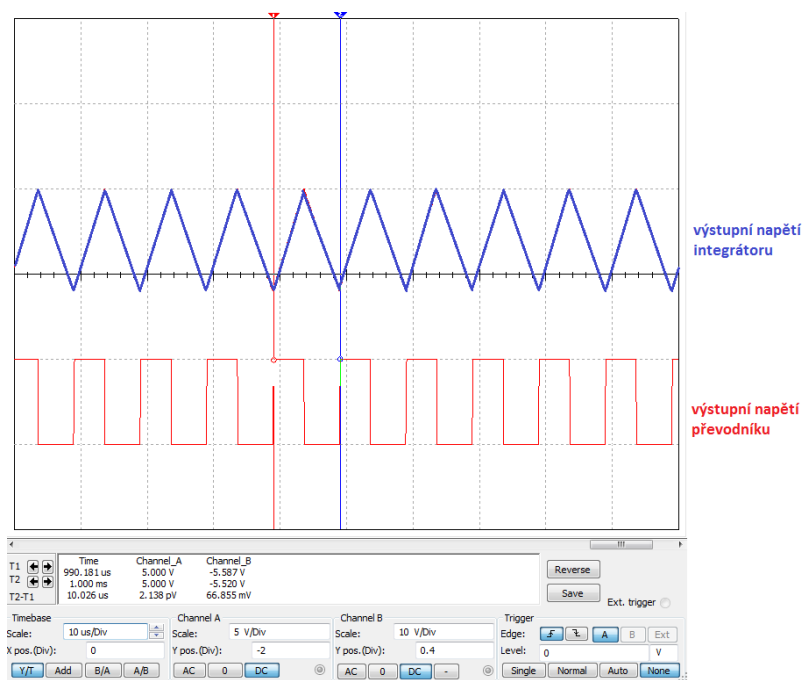
Obr. 3.12: Převodní charakteristika, $f_{max}=100kHz$



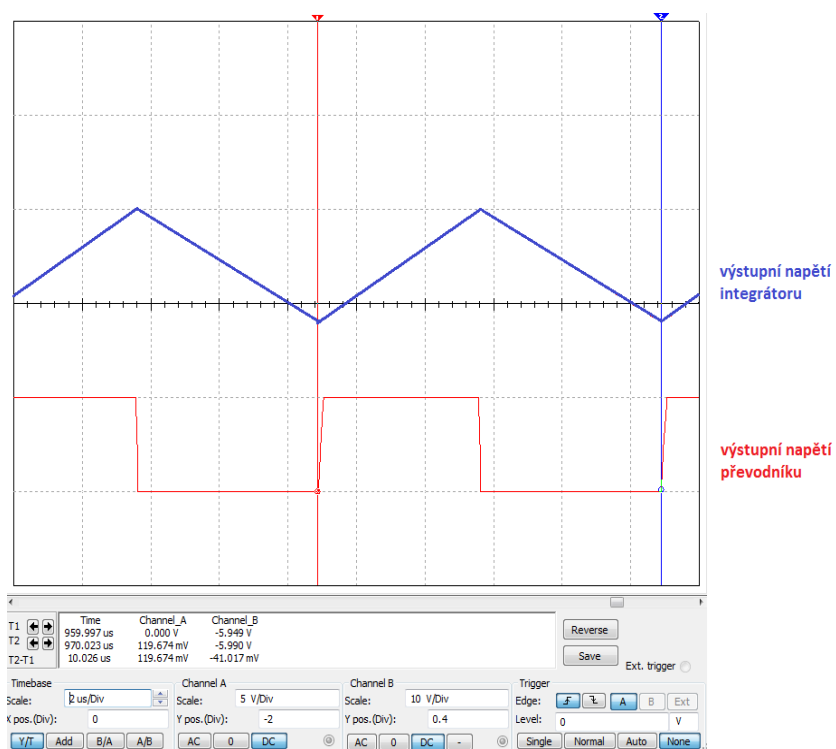
Obr. 3.13: Nelinearita převodu, $f_{max}=100kHz$



Obr. 3.14: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=50kHz$



Obr. 3.15: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=100\text{kHz}$



Obr. 3.16: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{out}=100\text{kHz}$

3.3.3 Simulace převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=500\text{kHz}$

Tab. 3.9: Převodní charakteristika, $f_{\max}=500\text{kHz}$

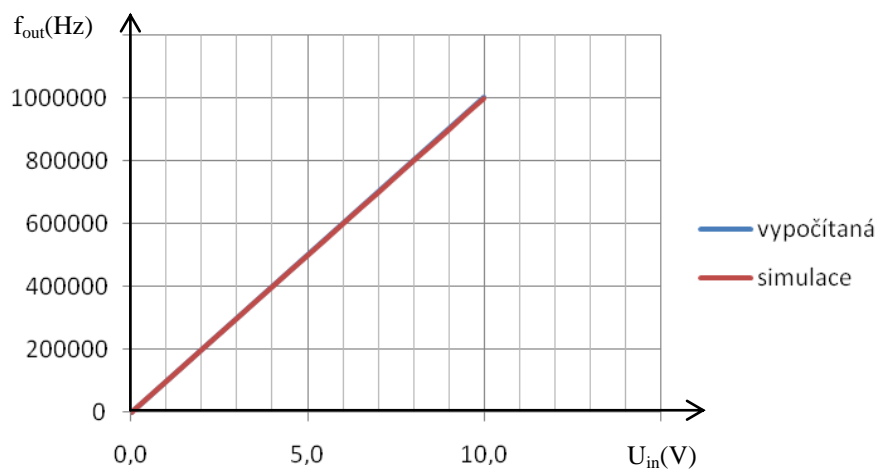
Vstupní napětí U_{in}	Výstupní frekvence změřená f_{out}	Výstupní frekvence vypočítaná f_{out}	Nelinearita převodu
(V)	(Hz)	(Hz)	(%)
0,0	0,00	0	-----
0,5	25001,25	25000	0,005
1,0	49990,00	50000	0,020
1,5	75018,75	75000	0,025
2,0	99965,00	100000	0,035
2,5	125011,25	125000	0,009
3,0	149941,50	150000	0,039
3,5	175035,00	175000	0,020
4,0	200016,00	200000	0,008
4,5	224939,25	225000	0,027
5,0	249940,00	250000	0,024
5,5	274967,00	275000	0,012
6,0	300144,00	300000	0,048
6,5	325117,00	325000	0,036
7,0	349930,00	350000	0,020
7,5	375153,75	375000	0,041
8,0	399974,40	400000	0,006
8,5	425085,00	425000	0,020
9,0	450085,50	450000	0,019
9,5	475071,25	475000	0,015
10,0	499830,00	500000	0,034

Tab. 3.10: Časové parametry výstupního signálu, $f_{\max}=500\text{kHz}$

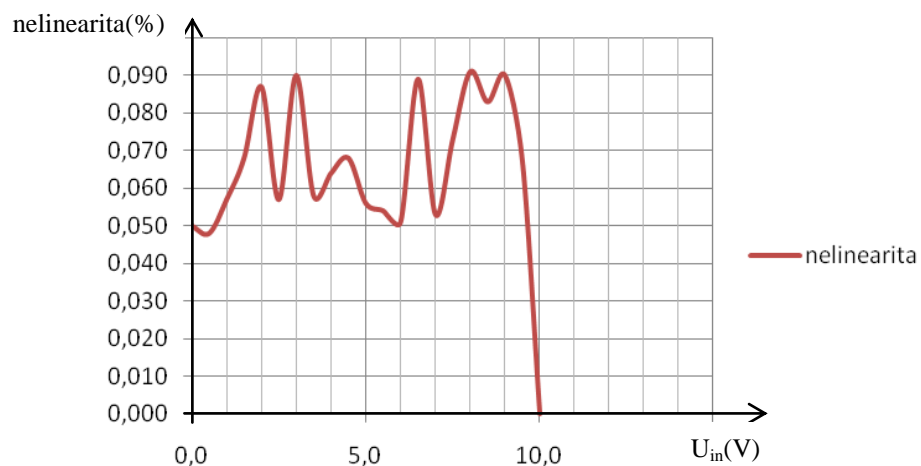
Vstupní napětí U_{in}	Doba pulzu	Doba nástupné hrany	Doba sestupné hrany
(V)	(μs)	(ns)	(ns)
0,0 – 10,0	0,98	160	60

Tab. 3.11: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{\max}=500\text{kHz}$

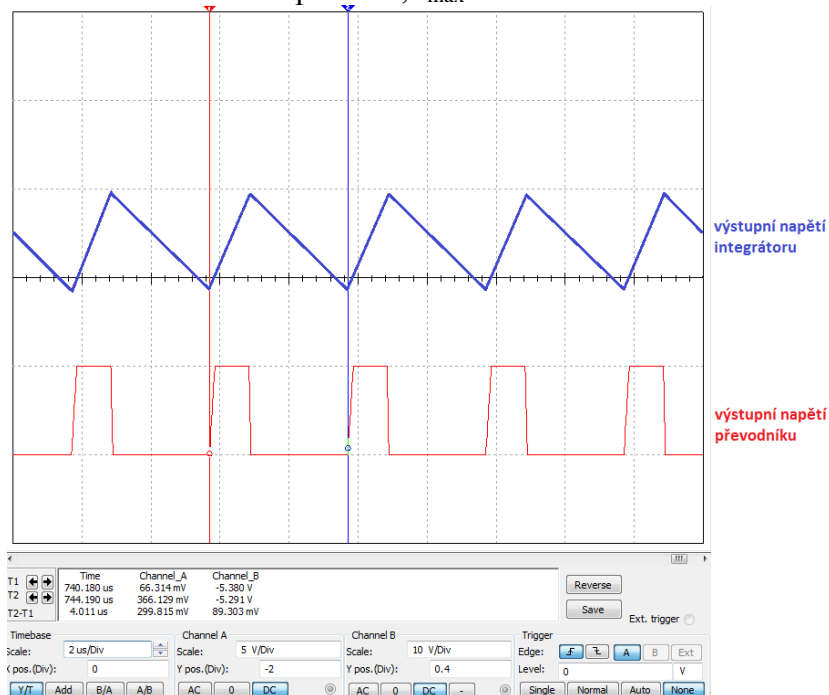
R_{in}	C_{os}	C_{int}
20,41k Ω	100pF	1nF



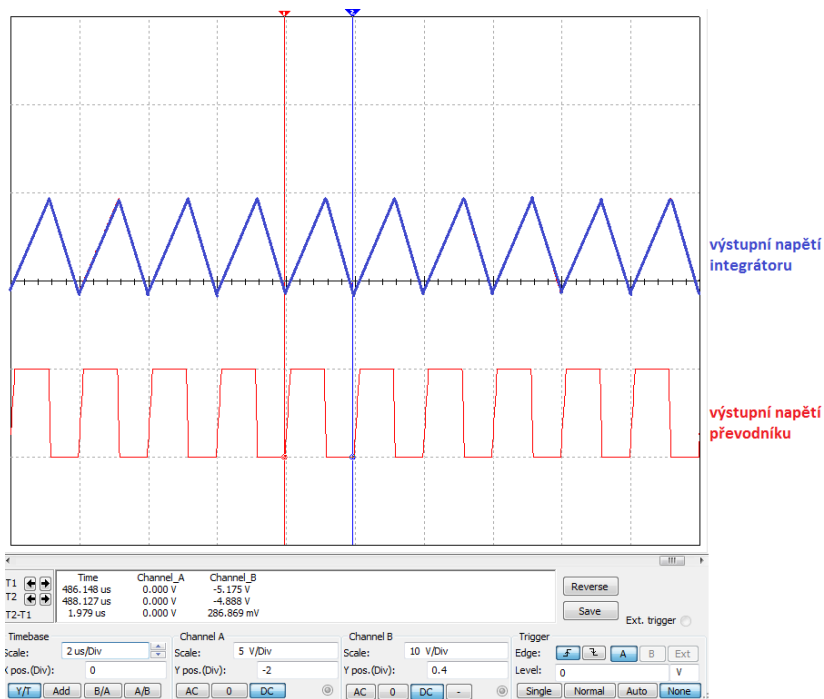
Obr. 3.17: Převodní charakteristika, $f_{max}=500kHz$



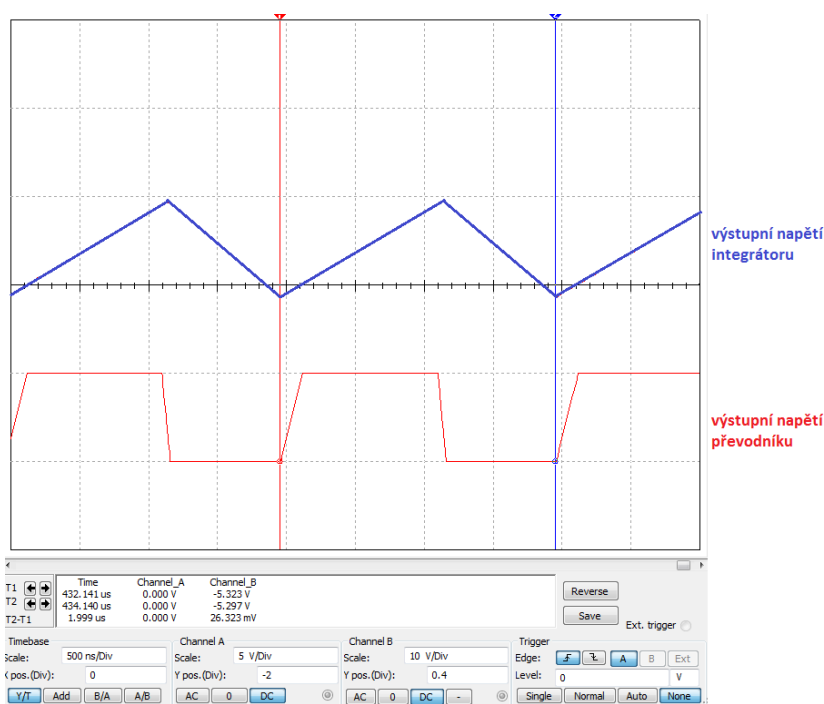
Obr. 3.18: Nelinearita převodu, $f_{max}=500kHz$



Obr. 3.19: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=250kHz$



Obr. 3.20: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=500\text{kHz}$



Obr. 3.21: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=500\text{kHz}$

3.3.4 Simulace převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=1\text{MHz}$

Tab. 3.12: Převodní charakteristika, $f_{\max}=1\text{MHz}$

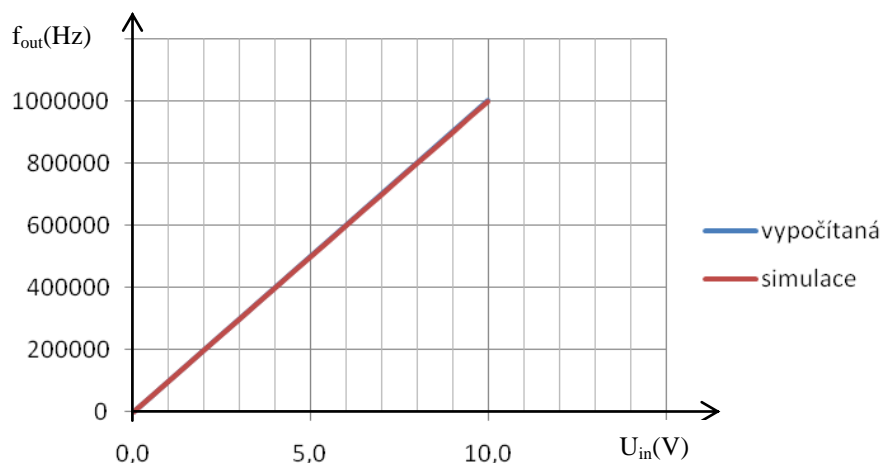
Vstupní napětí U_{in}	Výstupní frekvence změřená f_{out}	Výstupní frekvence vypočítaná f_{out}	Nelinearita převodu
(V)	(Hz)	(Hz)	(%)
0,0	0,0	0	-----
0,5	49975,0	50000	0,050
1,0	100048,0	100000	0,048
1,5	149914,5	150000	0,057
2,0	200136,0	200000	0,068
2,5	250217,5	250000	0,087
3,0	299829,0	300000	0,057
3,5	350315,0	350000	0,090
4,0	400232,0	400000	0,058
4,5	450288,0	450000	0,064
5,0	499660,0	500000	0,068
5,5	549692,0	550000	0,056
6,0	600324,0	600000	0,054
6,5	650331,5	650000	0,051
7,0	699377,0	700000	0,089
7,5	750397,5	750000	0,053
8,0	800584,0	800000	0,073
8,5	849226,5	850000	0,091
9,0	899253,0	900000	0,083
9,5	950855,0	950000	0,090
10,0	999330,0	1000000	0,067

Tab. 3.13: Časové parametry výstupního signálu, $f_{\max}=1\text{MHz}$

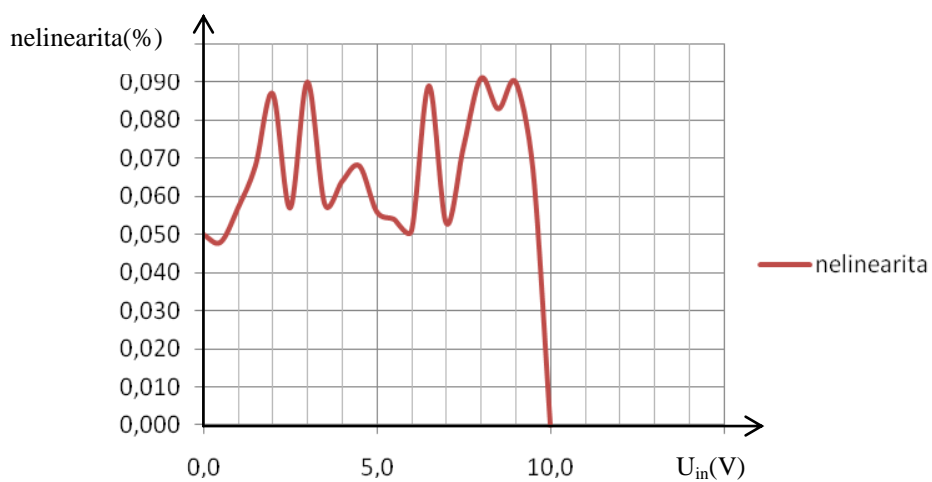
Vstupní napětí U_{in}	Doba pulzu	Doba nástupné hrany	Doba sestupné hrany
(V)	(μs)	(ns)	(ns)
0,0 – 10,0	0,64	160	60

Tab. 3.14: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{\max}=1\text{MHz}$

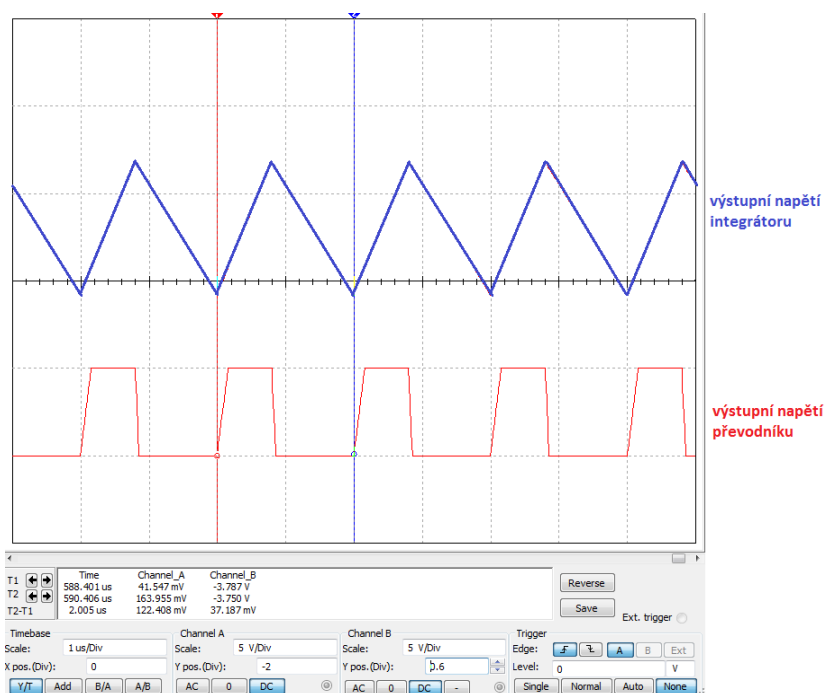
R_{in}	C_{os}	C_{int}
15,63k Ω	50pF	1nF



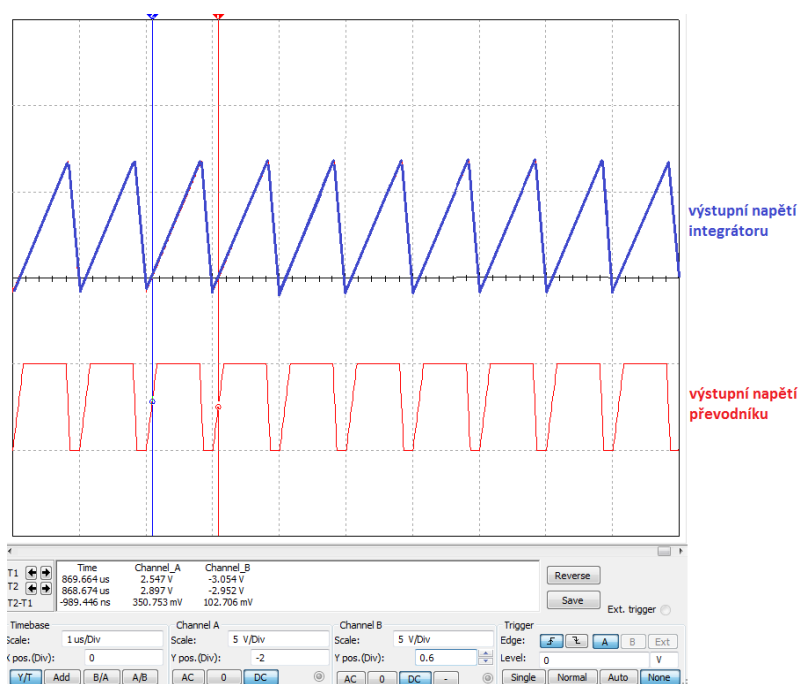
Obr. 3.22: Převodní charakteristika, $f_{\max}=1\text{MHz}$



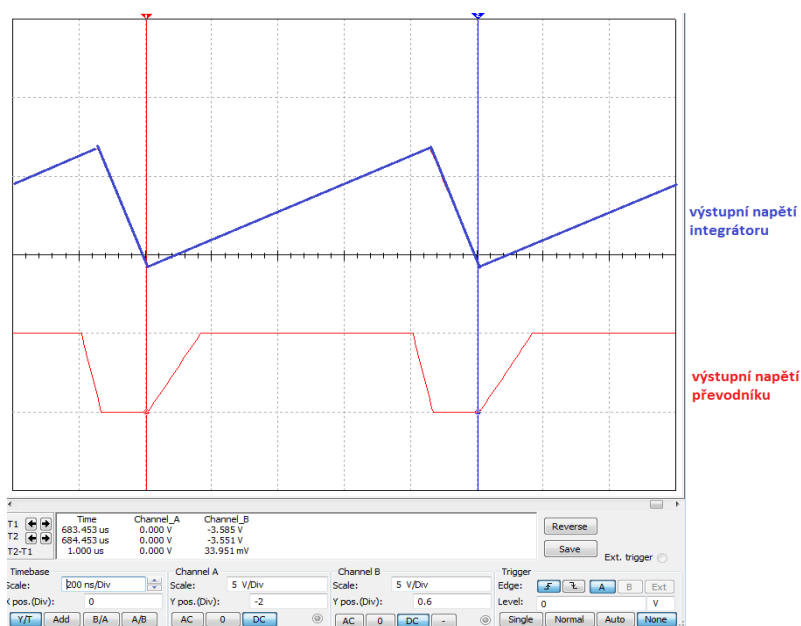
Obr. 3.23: Nelinearita převodu, $f_{\max}=1\text{MHz}$



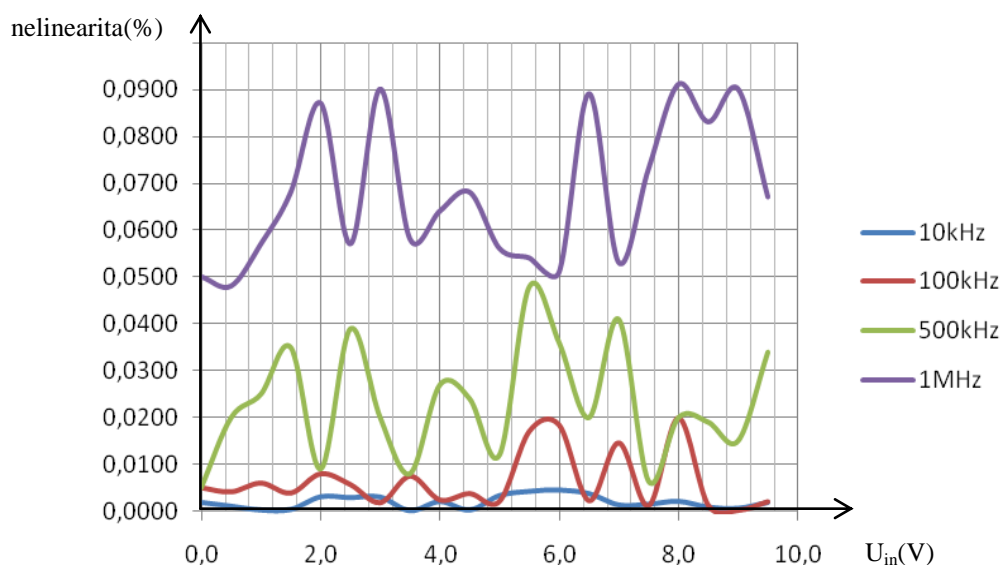
Obr. 3.24: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=500\text{kHz}$



Obr. 3.25: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=1\text{MHz}$



Obr. 3.26: Detail časových průběhů v obvodu převodníku $f_{\text{out}}=1\text{MHz}$



Obr. 3.27: Porovnání nelinearity převodu při všech rozsazích výstupní frekvence

3.3.5 Shrnutí výsledků simulace

Celá simulace převodníku s integrovaným obvodem AD650 byla provedena v programu NI Multisim Component Evaluator. Tento program obsahuje obvody od firmy Analog Devices a National Semiconductor. Volba na tento program padla z důvodu absence modelu integrovaného obvodu AD650 pro program PSpice.

Převodní charakteristiky

Při simulaci obvodu byly použity hodnoty externích součástek, z tabulky 3.1. Jak je patrné z grafů, znázorňujících převodní charakteristiky, je převodní charakteristika zjištěná simulací téměř shodná s převodní charakteristikou vypočítanou. V grafu se to projevuje překrytím obou charakteristik.

Nelinearita převodu

Při simulaci byla nelinearita převodu velmi nízká a v žádném z případů nelinearita nepřekročila maximální katalogovou hodnotu. Celkové porovnání nelinearity převodu pro jednotlivé rozsahy výstupní frekvence je uvedeno v obrázku 3.27. Z tohoto obrázku je patrné že největší nelinearitu převodu, má převodník na rozsahu 1MHz a nejnižší na rozsahu 10kHz, což odpovídá teoretickým předpokladům.

Výstupní signál

Z příslušných tabulek zobrazující výsledky měření parametrů výstupního signálu vyplývá, že všechny parametry zůstávaly během celé simulace konstantní na celém rozsahu výstupní frekvence. Jediným parametrem, který se během simulace měnil, byla doba trvání výstupního pulzu. Tato změna je ovšem žádoucí a velikost tohoto parametru závisí na kapacitě kondenzátoru C_{os} .

3.4 Výsledky měření převodníku s integrovaným obvodem AD650

Tato část kapitoly obsahuje výsledky měření navrženého převodníku s integrovaným obvodem AD650 jehož schéma je na obrázku 3.1. Je rozdělena na 4 části podle rozsahu výstupní frekvence. Všechny tyto části jsou obsahově shodné. Každá z částí obsahuje naměřené hodnoty převodní charakteristiky, hodnoty součástek pro nastavení aktuálního rozsahu výstupní frekvence, časové parametry výstupního signálu, a grafické zpracování těchto výsledků.

3.4.1 Měření převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=10\text{kHz}$

Tab. 3.15: Převodní charakteristika, $f_{\max}=10\text{kHz}$

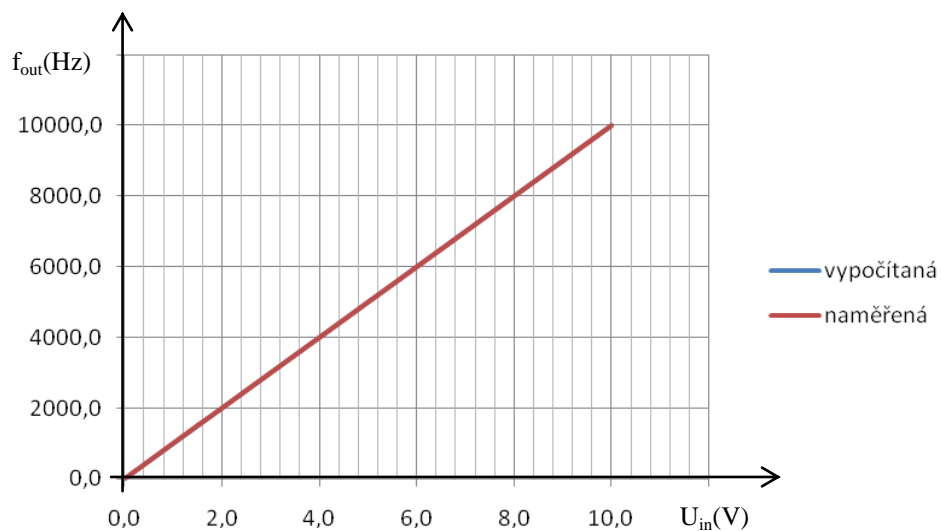
Vstupní napětí U_{in}	Výstupní frekvence změřená f_{out}	Výstupní frekvence vypočítaná f_{out}	Nelinearita převodu
(V)	(Hz)	(Hz)	(%)
0,0	0,000	0,0	-----
0,1	100,012	100,0	0,012
0,5	501,901	500,0	0,380
1,0	1006,451	1000,0	0,645
1,5	1510,501	1500,0	0,700
2,0	1998,899	2000,0	0,055
2,5	2499,876	2500,0	0,005
3,0	3000,005	3000,0	0,000
3,5	3500,014	3500,0	0,000
4,0	4000,327	4000,0	0,008
4,5	4501,429	4500,0	0,032
5,0	5001,844	5000,0	0,037
5,5	5501,348	5500,0	0,025
6,0	6002,559	6000,0	0,043
6,5	6503,321	6500,0	0,051
7,0	7002,684	7000,0	0,038
7,5	7504,600	7500,0	0,061
8,0	8004,591	8000,0	0,057
8,5	8504,985	8500,0	0,059
9,0	9006,118	9000,0	0,068
9,5	9507,258	9500,0	0,076
10,0	10007,652	10000,0	0,077

Tab. 3.16: Časové parametry výstupního signálu, $f_{\max}=10\text{kHz}$

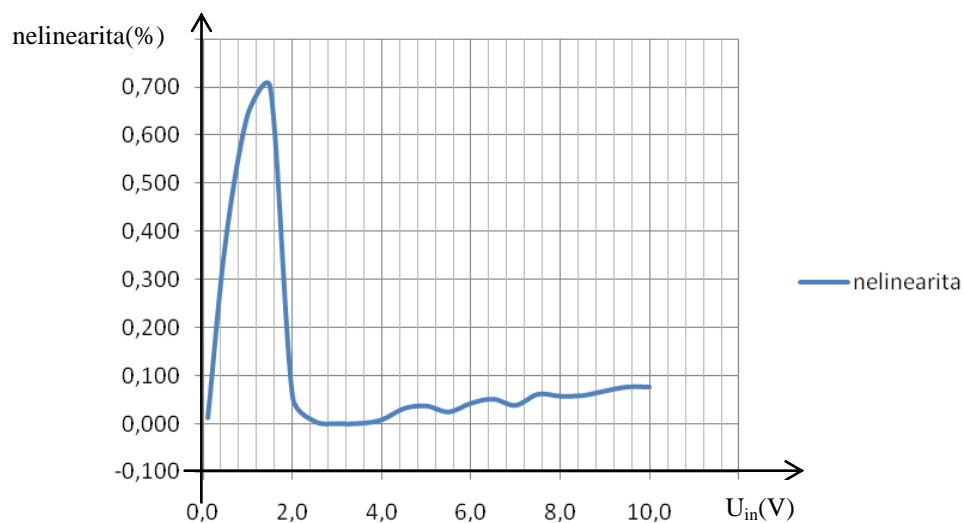
Vstupní napětí U_{in}	Doba pulzu	Doba nástupné hrany	Doba sestupné hrany
(V)	(μs)	(ns)	(ns)
0,0 – 10,0	5,98	168	60 - 58

Tab. 3.17: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{\max}=10\text{kHz}$

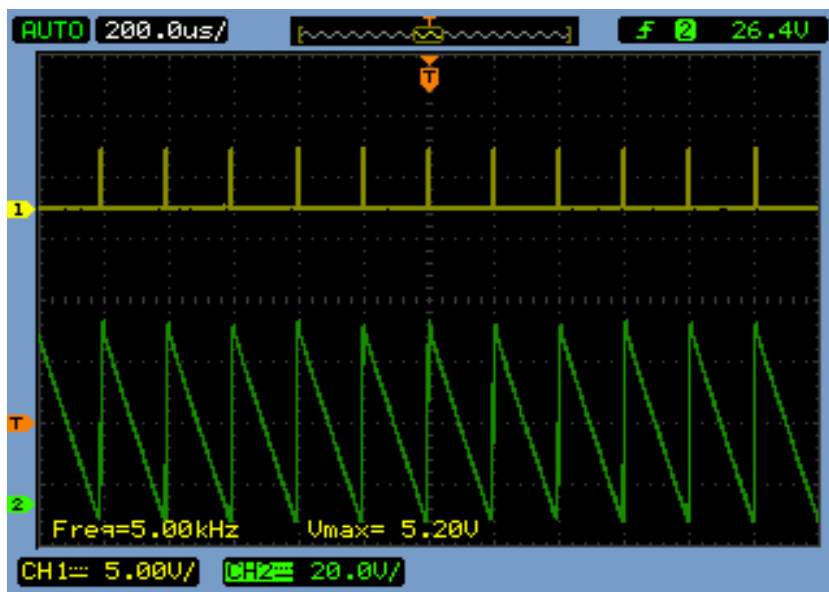
R_{in}	C_{os}	C_{int}
150,8k Ω	1nF	1nF



Obr. 3.28: Převodní charakteristika, $f_{\max}=10\text{kHz}$



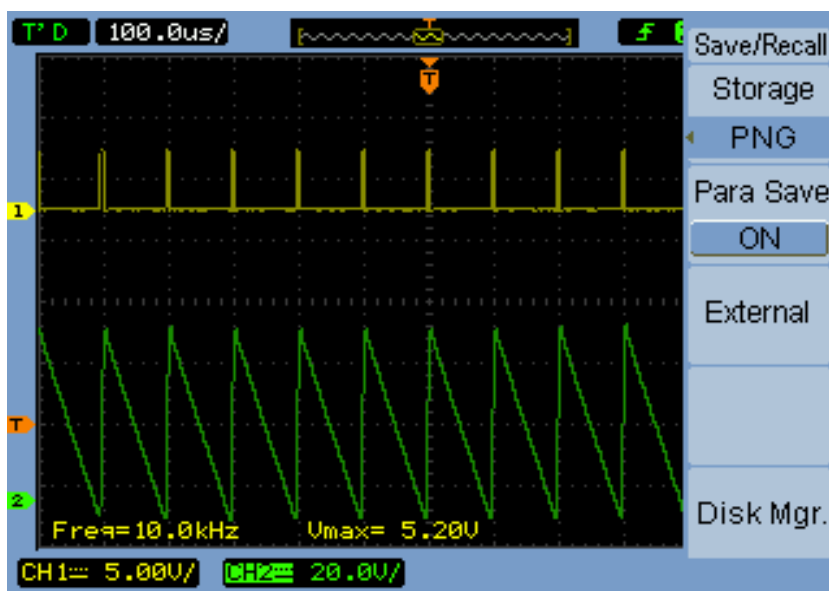
Obr. 3.29: Nelinearita převodu, $f_{\max}=10\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

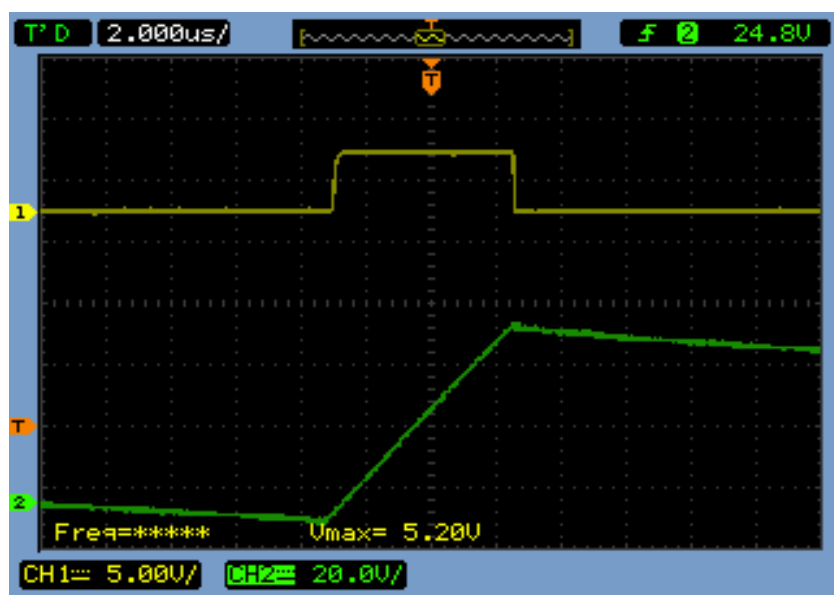
Obr. 3.30: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=5\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

Obr. 3.31: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=10\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

Obr. 3.32: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=10\text{kHz}$

3.4.2 Měření převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=100\text{kHz}$

Tab. 3.18: Převodní charakteristika, $f_{\max}=100\text{kHz}$

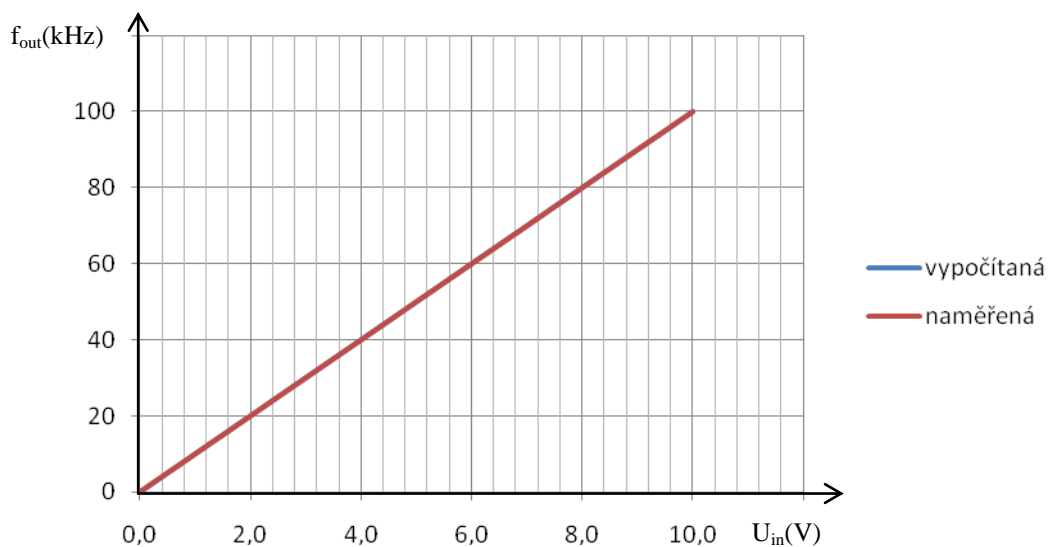
Vstupní napětí U_{in}	Výstupní frekvence změřená f_{out}	Výstupní frekvence vypočítaná f_{out}	Nelinearita převodu
(V)	(kHz)	(kHz)	(%)
0,0	0,000	0,0	-----
0,1	1,003	1,0	0,300
0,5	5,002	5,0	0,040
1,0	10,010	10,0	0,100
1,5	15,014	15,0	0,093
2,0	20,010	20,0	0,050
2,5	25,021	25,0	0,084
3,0	30,021	30,0	0,070
3,5	35,017	35,0	0,049
4,0	40,010	40,0	0,025
4,5	45,029	45,0	0,064
5,0	50,029	50,0	0,058
5,5	55,026	55,0	0,047
6,0	60,041	60,0	0,068
6,5	65,045	65,0	0,069
7,0	70,036	70,0	0,051
7,5	75,052	75,0	0,069
8,0	80,053	80,0	0,066
8,5	85,052	85,0	0,061
9,0	90,072	90,0	0,080
9,5	95,060	95,0	0,063
10,0	100,061	100,0	0,061

Tab. 3.19: Časové parametry výstupního signálu, $f_{\max}=100\text{kHz}$

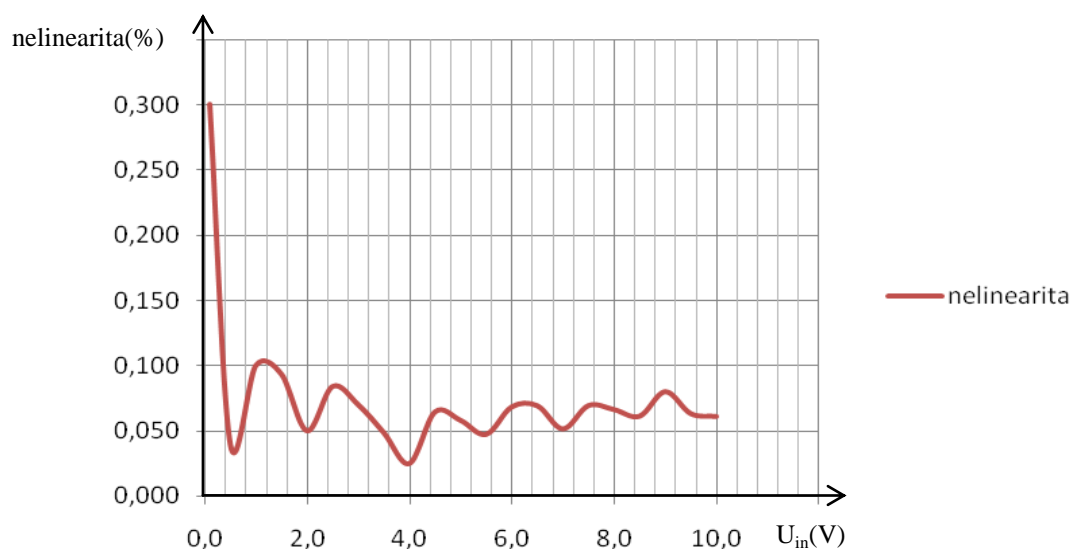
Vstupní napětí U_{in}	Doba pulzu	Doba nástupné hrany	Doba sestupné hrany
(V)	(ns)	(ns)	(ns)
0,0 – 10,0	720 -716	160 - 154	50 - 48

Tab. 3.20: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{\max}=100\text{kHz}$

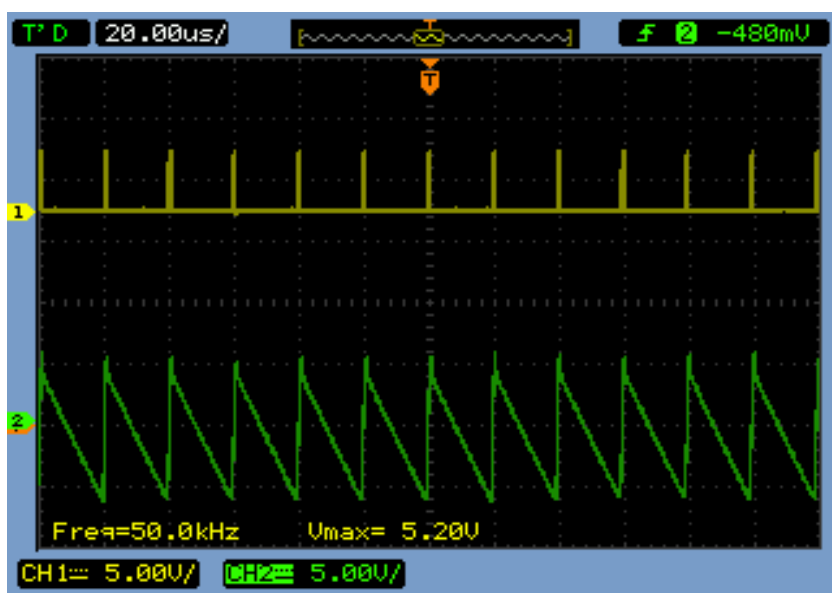
R_{in}	C_{os}	C_{int}
102,1k Ω	100pF	1nF



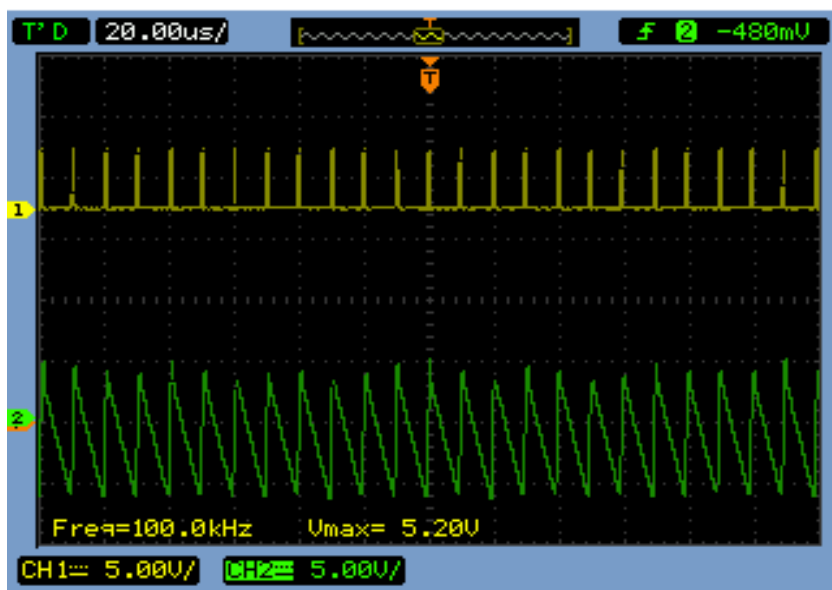
Obr. 3.33: Převodní charakteristika, $f_{max}=100\text{kHz}$



Obr. 3.34: Nelinearita převodu, $f_{max}=100\text{kHz}$



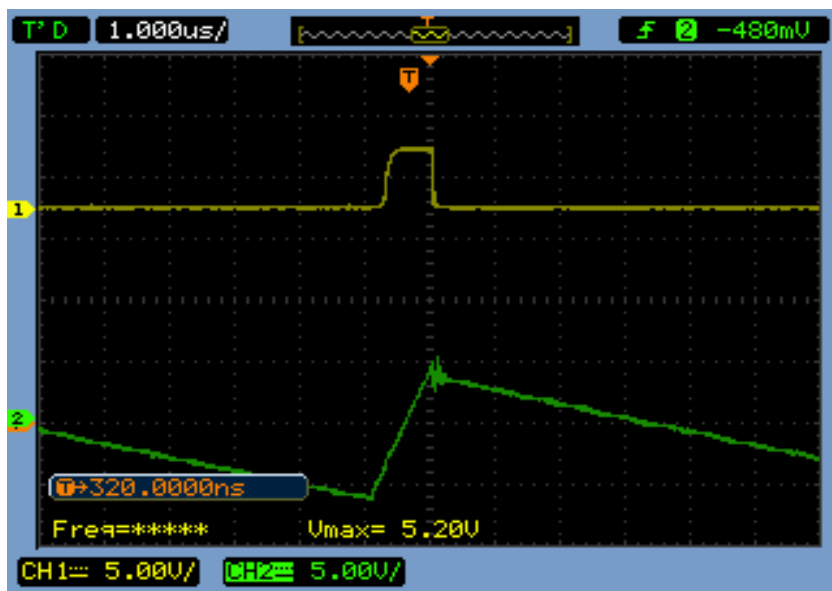
Obr. 3.35: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=50\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

Obr. 3.36: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=100\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

Obr. 3.37: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=100\text{kHz}$

3.4.3 Měření převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=500\text{kHz}$

Tab. 3.21: Převodní charakteristika, $f_{\max}=500\text{kHz}$

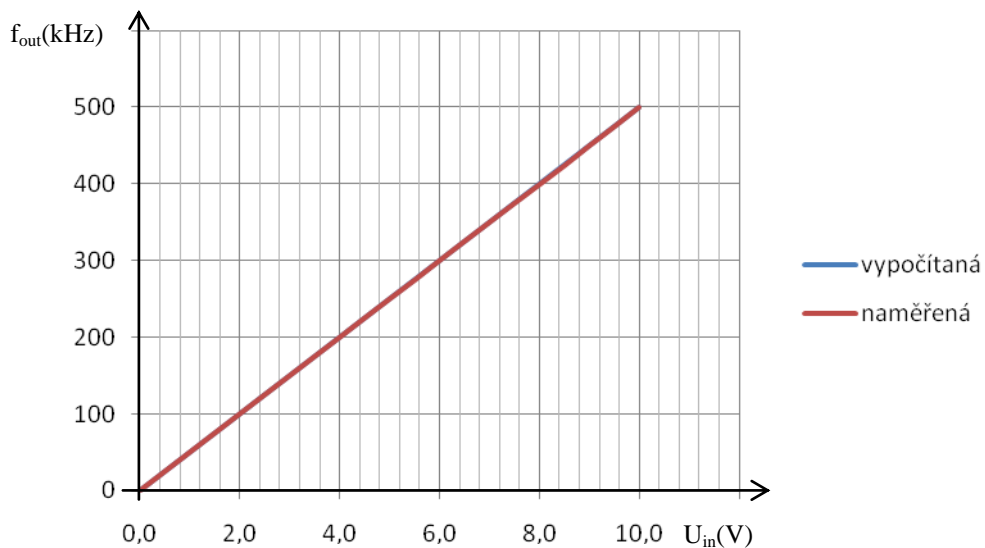
Vstupní napětí U_{in}	Výstupní frekvence změřená f_{out}	Výstupní frekvence vypočítaná f_{out}	Nelinearita převodu
(V)	(kHz)	(kHz)	(%)
0,0	0,000	0	-----
0,1	5,025	5	0,500
0,5	25,003	25	0,012
1,0	50,011	50	0,022
1,5	74,989	75	0,015
2,0	99,951	100	0,049
2,5	124,967	125	0,026
3,0	149,969	150	0,021
3,5	174,882	175	0,067
4,0	199,805	200	0,097
4,5	224,953	225	0,021
5,0	249,878	250	0,049
5,5	274,458	275	0,197
6,0	299,915	300	0,028
6,5	324,987	325	0,004
7,0	349,775	350	0,064
7,5	374,546	375	0,121
8,0	399,010	400	0,248
8,5	423,644	425	0,319
9,0	449,662	450	0,075
9,5	474,542	475	0,096
10,0	500,041	500	0,008

Tab. 3.22: Časové parametry výstupního signálu, $f_{\max}=500\text{kHz}$

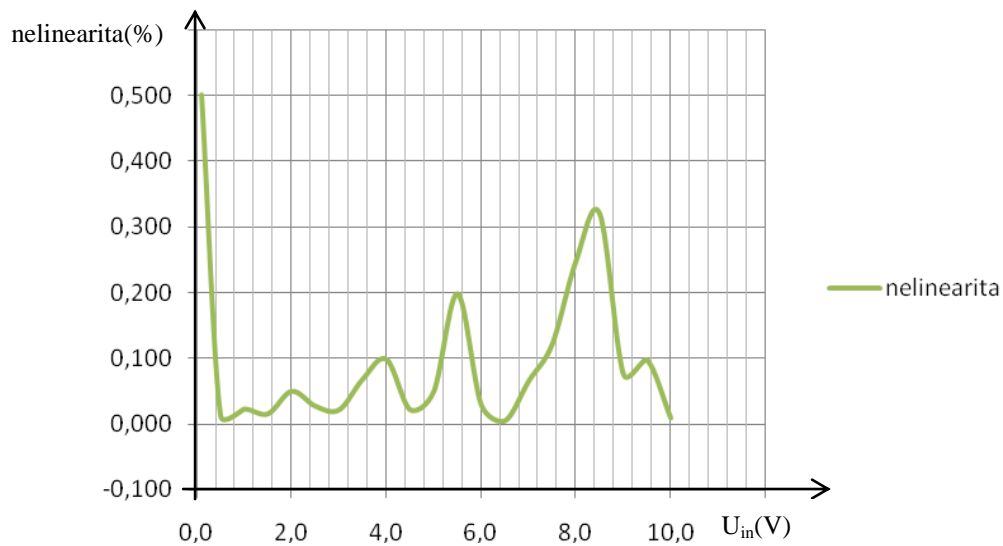
Vstupní napětí U_{in}	Doba pulzu	Doba nástupné hrany	Doba sestupné hrany
(V)	(ns)	(ns)	(ns)
0,0 – 10,0	392 – 389	158 – 136	50 – 44

Tab. 3.23: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{\max}=500\text{kHz}$

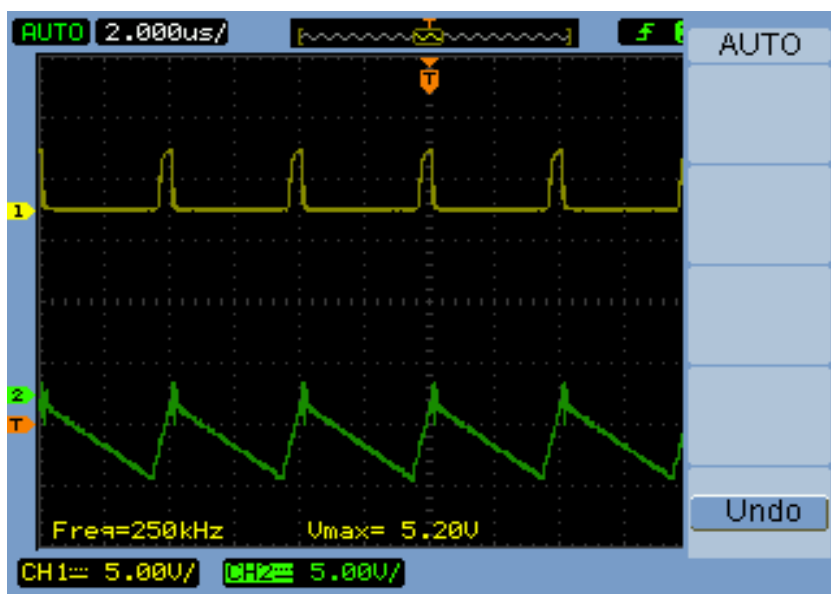
R_{in}	C_{os}	C_{int}
31,7k Ω	51pF	1nF



Obr. 3.38: Převodní charakteristika, $f_{max}=500\text{kHz}$



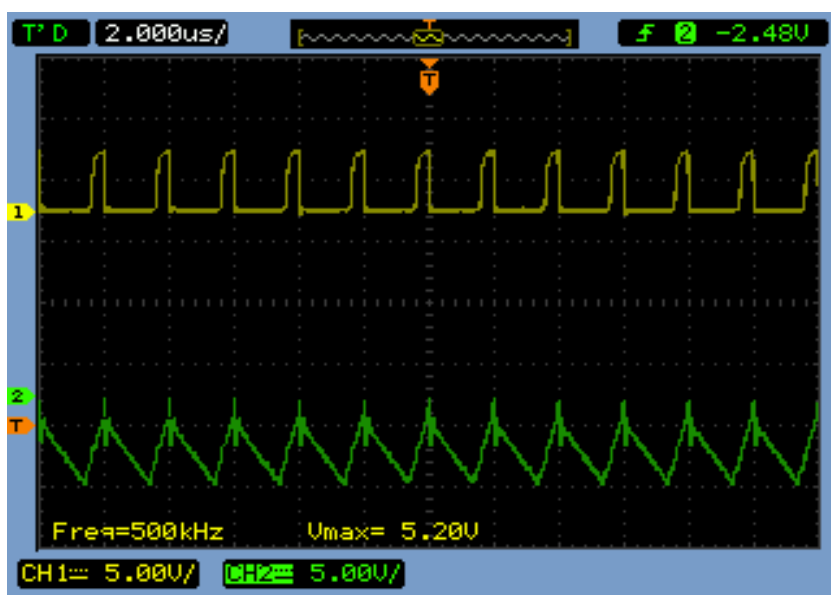
Obr. 3.39: Nelinearita převodu, $f_{max}=500\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

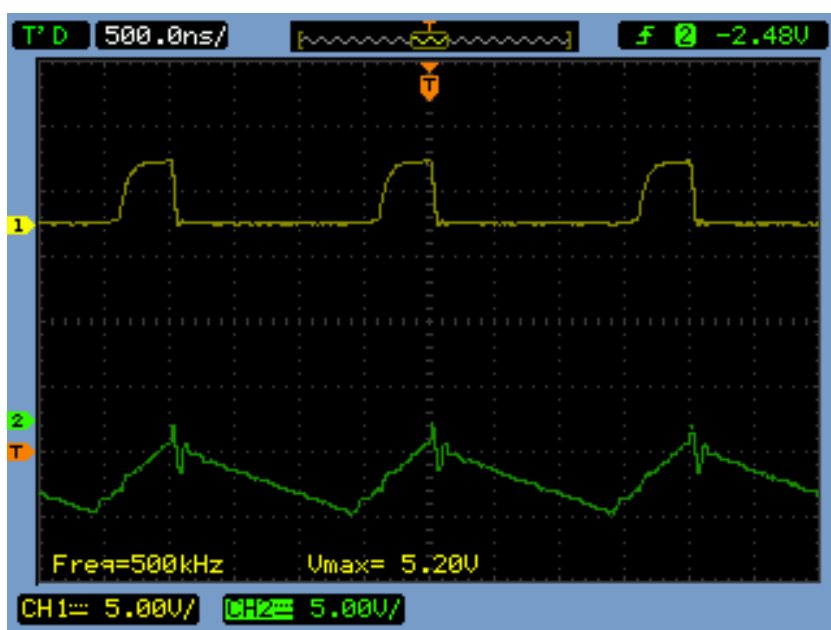
Obr. 3.40: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=250\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

Obr. 3.41: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=500\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

Obr. 3.42: Detail průběhu při vstupním napětí 10V

3.4.4 Měření převodu pro maximální výstupní frekvenci $f_{\max}=1\text{MHz}$

Tab. 3.24: Převodní charakteristika, $f_{\max}=1\text{MHz}$

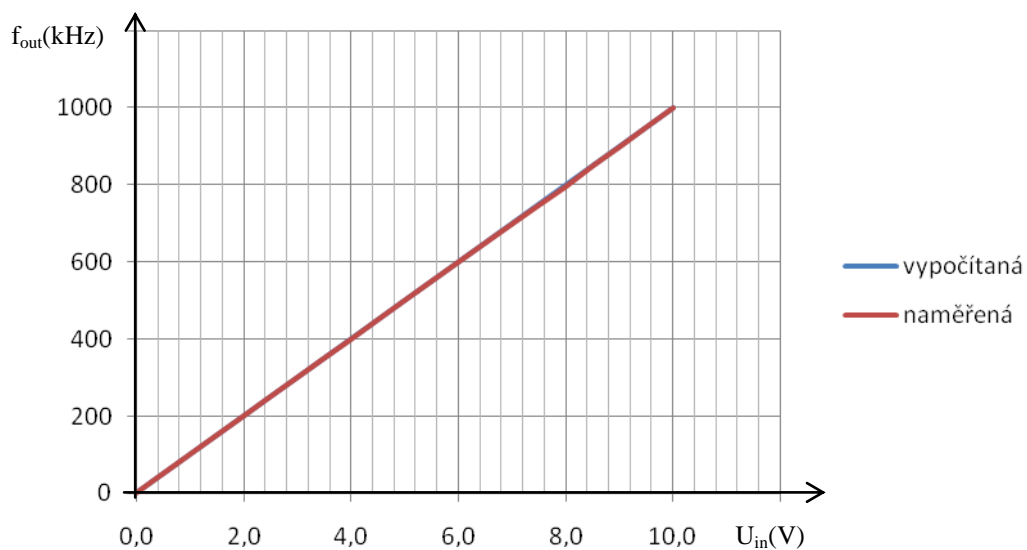
Vstupní napětí U_{in}	Výstupní frekvence změřená f_{out}	Výstupní frekvence vypočítaná f_{out}	Nelinearita převodu
(V)	(kHz)	(kHz)	(%)
0,0	0,000	0	-----
0,1	10,012	10	0,120
0,5	49,988	50	0,024
1,0	100,024	100	0,024
1,5	150,029	150	0,019
2,0	199,877	200	0,061
2,5	250,005	250	0,002
3,0	300,045	300	0,015
3,5	349,959	350	0,012
4,0	399,162	400	0,210
4,5	449,958	450	0,009
5,0	500,249	500	0,050
5,5	550,042	550	0,008
6,0	599,850	600	0,025
6,5	649,442	650	0,086
7,0	698,877	700	0,160
7,5	747,889	750	0,281
8,0	795,931	800	0,509
8,5	849,729	850	0,032
9,0	899,059	900	0,105
9,5	950,411	950	0,043
10,0	1000,543	1000	0,054

Tab. 3.25: Časové parametry výstupního signálu, $f_{\max}=1\text{MHz}$

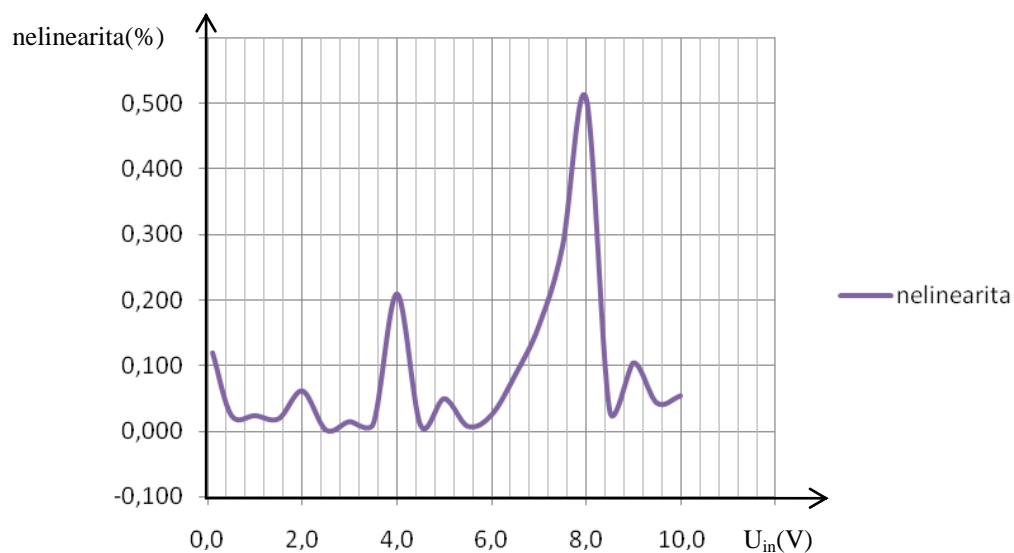
Vstupní napětí U_{in}	Doba pulzu	Doba nástupné hrany	Doba sestupné hrany
(V)	(ns)	(ns)	(ns)
0,0 – 10,0	396 – 388	166 – 152	52 – 47

Tab. 3.26: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{\max}=1\text{MHz}$

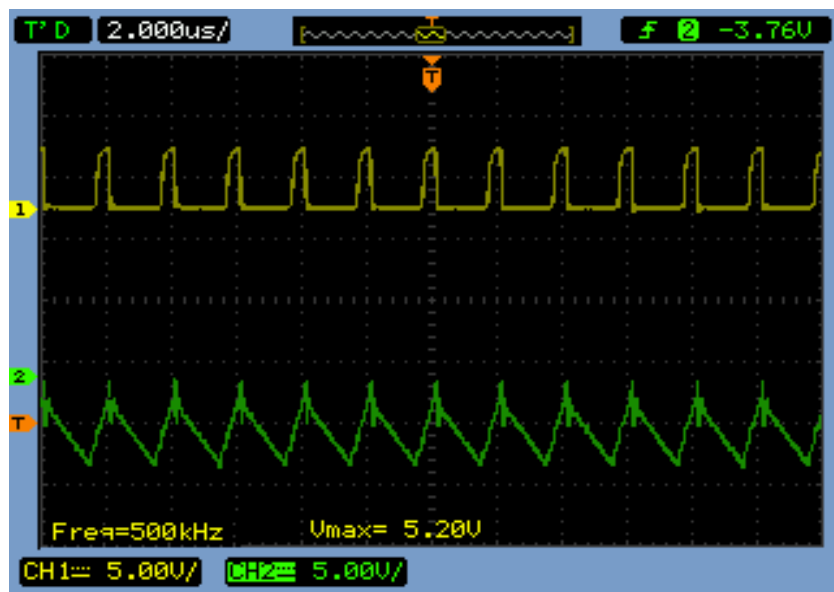
R_{in}	C_{os}	C_{int}
15,87k Ω	51pF	1nF



Obr. 3.43: Převodní charakteristika, $f_{max}=1\text{MHz}$



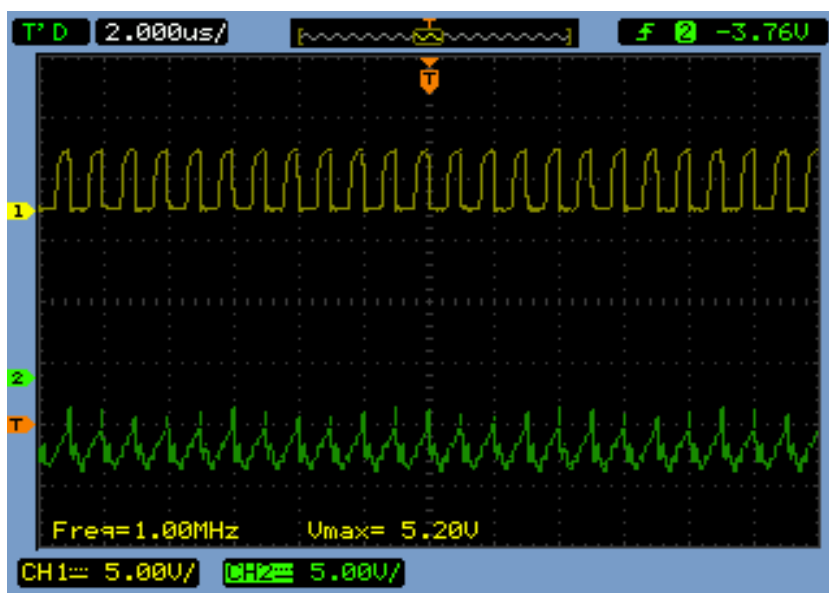
Obr. 3.44: Nelinearita převodu, $f_{max}=1\text{MHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

Obr. 3.45: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=500\text{kHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

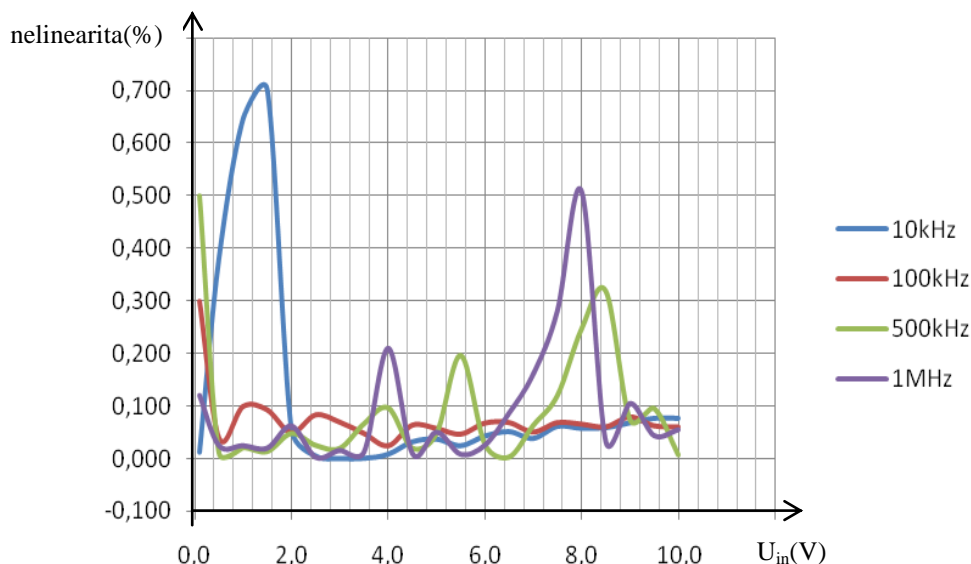
Obr. 3.46: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=1\text{MHz}$



Výstupní signál
převodníku

Výstupní signál
z integrátoru

Obr. 3.47: Detail časových průběhů napětí v obvodu převodníku, $f_{\text{out}}=1\text{MHz}$



Obr. 3.48: Nelinearita převodu všech rozsahů

3.4.5 Vzor výpočtu

Výpočet nelinearity převodu podle vztahu 1.1, platí pro $f_{\max}=1\text{MHz}$ a pro $U_{\text{in}}=5\text{V}$

$$\text{nelinearita} = \left| \frac{f_{\text{naměř}} - f_{\text{vypočítáná}}}{f_{\text{vypočítáná}}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{500249 - 500000}{500000} \right| \cdot 100 = 0,0498\%$$

3.4.6 Shrnutí výsledků měření

Převodní charakteristiky

Jak je patrné z tabulek převodních charakteristik pro jednotlivé rozsahy, je převod napětí na frekvenci proveden velmi kvalitně. Z toho také vyplývá fakt, že v grafech znázorňující převodní charakteristiky se obě charakteristiky, naměřená i vypočítaná, překrývají a ve výsledku se mohou jevit jako jediná.

Nelinearita převodu

Z obrázku 3.48 je patrné, že převod měl největší nelinearitu při rozsahu výstupní frekvence 10kHz a hodnotě výstupní frekvence přibližně v rozsahu 0,5kHz až 1,5kHz. Při porovnání naměřených hodnot s katalogovými hodnotami, které je uvedeny v tabulce 3.27, je dosaženo závěru, že nelinearita převodu navrženého převodníku je na všech rozsazích větší než typické hodnoty uvedené v katalogu. Tato skutečnost je zřejmě dána použitými součástkami nebo nevhodným rozmístěním součástek na desce plošného spoje. Porovnání katalogových hodnot a hodnot dosažených při měření navrženého převodníku je uvedeno v tabulce 3.27. V této tabulce jsou uvedeny nejhorší varianty, které mohou nastat.

Přesto, že se může zdát, že nelinearita převodu měřeného převodníku je v porovnání s katalogovými hodnotami vysoká, je pro použití pro studijní účely velmi dobrá a dle mého názoru je vyhovující i pro využití v praxi.

Tab. 3.27.: Porovnání naměřených hodnot a katalogových hodnot nelinearity převodu

Maximální výstupní frekvence	Nelinearita	
	Katalogová hodnota	Naměřená hodnota
10kHz	0,005%	0,700%
100kHz	0,020%	0,300%
500kHz	0,050%	0,500%
1MHz	0,100%	0,509%

Výstupní signál a jeho parametry

Při měření se časové parametry výstupního signálu bohužel nedržely na konstantních hodnotách, ale měnili se v řádech jednotek až desítek procent. Rozsah těchto parametrů je uveden v příslušných tabulkách. Výstupní signál měl napětí 5,2V, přestože napětí pro výstupní signál bylo nastaveno na 5V. Tato menší chyba vznikla pravděpodobně nabíjením kondenzátoru C_{out} po dobu, kdy je výstupní signál v logické úrovni 0 a vybíjením toho samého kondenzátoru v době, kdy je výstupní signál v logické úrovni 1. Kondenzátor C_{out} zde funguje jako lokální zásobník energie.

Další skutečností, na kterou je potřeba poukázat je délka trvání výstupního pulzu. S využitím vztahu 3.1 je možné si vypočítat dobu výstupního pulzu. Při pohledu na tabulky časových parametrů, které byly získány při měření, je ovšem patrné, že doba trvání pulzu má jinou hodnotu, než jaká je vypočítaná. Tato chyba zřejmě nastala díky použití digitálního osciloskopu pro měření časových parametrů.

Přístroje použité při měření

Měření převodníku s integrovaným obvodem AD650, stejně jako převodníku vytvořeného z diskrétních součástek probíhalo v laboratoři PA329. Snahou bylo vybírat co možná nejpresnější přístroje, aby byl výsledek měření velmi přesný, a nebyl zatížen chybou měření.

Tab. 3.28: Přístroje použité při měření

Funkce	Přístroj
Měření výstupní frekvence	Čítač Hewlett Packard 53132A
Měření parametrů výstupního signálu	Digitální osciloskop DSO 1002A
Napájecí zdroj	Hewlett Packard E3631A
Zdroj napětí pro výstupní signál	Hewlett Packard E3631A
Zdroj vstupního napětí	DF1731SB

4. Porovnání výsledků simulace a výsledků měření

Parametry, které lze porovnávat jsou nelinearita převodu a stálost parametrů výstupního signálu včetně tvaru výstupního signálu.

Nelinearita převodu

Při simulaci bylo nejvyšší nelinearity dosaženo při rozsahu výstupní frekvence $f_{\max}=1\text{MHz}$, což odpovídá také teoretickým předpokladům. Na rozdíl od simulace byla největší nelinearita při měření dosažena při rozsahu výstupní frekvence $f_{\max}=10\text{kHz}$. Bylo tomu tak ovšem jen při několika málo hodnotách vstupního napětí a zřejmě k tomuto faktu došlo nějakým rušením.

Stálost časových parametrů výstupního signálu

Při simulaci byly všechny parametry 100% stálé. Zatímco při měření převodníku se všechny časové parametry (doba pulzu, doba náběžné hrany i doba sestupné hrany) měnili. Tato změna byla v řádech jednotek nanosekund, ale i to znamená, například u doby sestupné hrany, téměř 10% změnu.

Co se týče tvaru výstupního signálu, je mezi simulací a měřením také rozdíl. Zatímco při simulaci, je výstupní signál bez překmitů, tak u měření se malé překmity vyskytují. Největším rozdílem je však hodnota výstupního napětí. Při simulaci je to přesně nastavených 5V, kdežto u měření se hodnota zvýšila na 5,2V, jak je uvedeno na konci předchozí kapitoly.

5. Použití převodníků napětí na frekvenci

5.1 Obecné využití převodníků napětí na frekvenci

Převodníky napětí na frekvenci se uplatňují všude tam, kde je potřeba měnit frekvenci a to jinak, než změnou hodnot obvodových součástek. Toho se využívá například ve smyčce fázového závěsu, v obvodech syntezátorů. Dalším místem, kde se využívá napětím řízených oscilátorů, je generátor časové základny pro řídicí obvody pulzních měničů nebo střídačů.[2] Převodníky napětí na frekvenci se rovněž využívají při řízení otáček krokových motorů. Dalším velkým odvětvím, kde se využívá napětím řízených oscilátorů, jsou mobilní telefony, které pro svou funkci potřebují možnost změny frekvenci téměř neustále.

5.2 Hlavní použití převodníku využívající obvodu AD650

Převodník napětí na frekvenci s obvodem AD650, bývá velmi často použit v analogových obvodech, zaměřených na přenos signálu. Dalším odvětvím, kde se používá převodník vybavený obvodem AD650 je automobilový průmysl, ve kterém se využívá převodníku v tachometrech. Pokud bude obvod zapojený v režimu převodu frekvence na napětí, lze jej použít v obvodech demodulátorů.[2]

Závěr

Převodník sestavený z diskrétních součástek

V práci je naznačen základní princip převodu napětí na frekvenci s využitím metody převodu, jenž využívá vhodného zapojení integrátoru, komparátoru a několika málo dalších součástek. U tohoto obvodu nejsou výsledky simulace ani výsledky měření uspokojivé, proto je také tento převodník vhodný pouze pro demonstraci principu převodu.

Simulace byla kompletně provedena v prostředí PSpice. Při simulaci byly použity modely součástek, které byly následně použity při měření. Přesto byl konečný rozdíl výsledků simulace a výsledků měření poměrně veliký.

Převodník sestavený z integrovaného obvodu AD650

V práci je taktéž popsán princip, kterého využívá převodník sestavený s integrovaným obvodem od firmy Analog Devices AD650. Na rozdíl od prvně zmiňovaného převodníku, byly výsledky simulace a také výsledky měření tohoto obvodu výrazně lepší.

Při simulaci jsem narazil na nepříjemný fakt, že funkční model tohoto obvodu není pro simulační prostředí PSpice k dispozici. Po dlouhém hledání jiného řešení, jsem našel simulační prostředí Multisim Component Evaluator, které vyrobila firma National Instruments, a ve kterém je k dispozici kompletní portfolio integrovaných obvodů firmy Analog device. Při simulaci převodníku v tomto prostředí bylo dosaženo výborných výsledků, které se velmi blížily, co se týče nelinearity převodu, ke katalogovým hodnotám.

Při měření obvodu bylo největším problémem samotný obvod sehnat. V České republice ho je možné sehnat buď ve velkých sériích, což by pro bakalářskou práci bylo dosti zbytečné, nebo i jednotlivě, ale za velmi vysokou cenu. Nejlepším řešením bylo obvod objednat u firmy Farnell, která byla schopna dodat i jediný obvod za rozumnou cenu. Jiný problém při měření převodníku s tímto obvodem nenastal.

Nelinearita převodu, která byla zjištěna měřením, nebyla sice tak ideální jako v případě simulace, ale i tak byla velmi dobrá.

Porovnání obou převodníků

Oba převodníky pracují na podobném principu. Ve výsledcích je ovšem nelze vůbec porovnávat. Zatímco převodník s integrovaným obvodem AD650 je téměř bezchybný, převodník sestavený z diskrétních součástek nedosahuje ani zlomku jeho kvality. Při volbě mezi oběma je zajisté lepší využít sice dražší, ale mnohem kvalitnější integrované formy.

Literatura

- [1] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika I*. České Budějovice : KOPP, 2005. 271 s.
- [2] AD650 Voltage-to-Frequency and Frequency-to-Voltage Converter [online].c 2006,
<http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD650.pdf>
- [3] UA741 Operational Amplifier [online].c 1998
<http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/310/310-017/dsh.310-017.1.pdf>
- [4] KYSELÝ L.; VESELÁ Z. *Číslicová technika: skripta*. Olomouc: VOŠ a SPŠE Olomouc 2003. 44s.
- [5] RONEŠOVÁ, Andrea. Domácí stránka Andrey Ronešové [online]. 2004 [cit. 2010-12-17]. Relaxační generátory a převodníky U/f. Dostupné z WWW:
<http://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=aes_muf#Schema2>.

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Určení nelinearity převodu[2]	8
Obr. 2.1: Zapojení operačního zesilovače jako integrátoru [1].....	10
Obr. 2.2: Princip integrátoru [1].....	10
Obr. 2.3: Schéma zapojení komparátoru s hysterezí [1]	11
Obr. 2.4: Převodní charakteristika komparátoru s hysterezí [1]	11
Obr. 2.5: Schéma zapojení jednoduchého převodníku napětí na frekvenci [5]	12
Obr. 2.6: Detail časových průběhů v převodníku napětí na frekvenci [5]	13
Obr. 2.7: Převodní charakteristika, zhotovená z výsledků simulace.....	17
Obr. 2.8: Závislost nelinearity převodu na vstupním napětí při simulaci	17
Obr. 2.9: Časové průběhy napětí v převodníku napětí na frekvenci, při $U_{in}=11V$	18
Obr. 2.10: Schéma zapojení převodníku, doplněné o obvod 555	19
Obr. 2.11: Naměřená převodní charakteristika	21
Obr. 2.12: Nelinearita převodu.....	21
Obr. 2.13: Časové průběhy napětí v převodníku.....	21
Obr. 3.1: Schéma zapojení převodníku U/f s kladným vstupním napětím [2].....	23
Obr. 3.2: Blokové schéma zapojení převodníku U/f [2]	23
Obr. 3.3: Integrovaní fáze Obr. 3.4: Resetovací fáze	25
Obr. 3.5: Časové průběhy napětí v obvodu AD650	25
Obr. 3.6: Graf závislosti hodnoty odporu vstupního rezistoru na zvolené kapacitě kondenzátoru C_{os} a rozsahu výstupní frekvence f_{out} [2]	26
Obr. 3.7: Převodní charakteristika, $f_{max}=10kHz$	30
Obr. 3.8: Nelinearita převodu, $f_{max}=10kHz$	30
Obr. 3.9: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=5kHz$	30
Obr. 3.10: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=10kHz$	31
Obr. 3.11: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{out}=10kHz$	31
Obr. 3.12: Převodní charakteristika, $f_{max}=100kHz$	33
Obr. 3.13: Nelinearita převodu, $f_{max}=100kHz$	33
Obr. 3.14: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=50kHz$	33
Obr. 3.15: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=100kHz$	34
Obr. 3.16: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{out}=100kHz$	34
Obr. 3.17: Převodní charakteristika, $f_{max}=500kHz$	36
Obr. 3.18: Nelinearita převodu, $f_{max}=500kHz$	36
Obr. 3.19: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=250kHz$	36
Obr. 3.20: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=500kHz$	37
Obr. 3.21: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{out}=500kHz$	37
Obr. 3.22: Převodní charakteristika, $f_{max}=1MHz$	39
Obr. 3.23: Nelinearita převodu, $f_{max}=1MHz$	39
Obr. 3.24: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=500kHz$	39
Obr. 3.25: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=1MHz$	40
Obr. 3.26: Detail časových průběhů v obvodu převodníku $f_{out}=1MHz$	40
Obr. 3.27: Porovnání nelinearity převodu při všech rozsazích výstupní frekvence.....	41
Obr. 3.28: Převodní charakteristika, $f_{max}=10kHz$	43
Obr. 3.29: Nelinearita převodu, $f_{max}=10kHz$	43
Obr. 3.30: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=5kHz$	44
Obr. 3.31: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=10kHz$	44
Obr. 3.32: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{out}=10kHz$	45
Obr. 3.33: Převodní charakteristika, $f_{max}=100kHz$	47
Obr. 3.34: Nelinearita převodu, $f_{max}=100kHz$	47
Obr. 3.35: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=50kHz$	47
Obr. 3.36: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=100kHz$	48

Obr. 3.37: Detail časových průběhů v obvodu převodníku, $f_{out}=100kHz$	48
Obr. 3.38: Převodní charakteristika, $f_{max}=500kHz$	50
Obr. 3.39: Nelinearita převodu, $f_{max}=500kHz$	50
Obr. 3.40: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=250kHz$	50
Obr. 3.41: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=500kHz$	51
Obr. 3.42: Detail průběhu při vstupním napětí 10V	51
Obr. 3.43: Převodní charakteristika, $f_{max}=1MHz$	53
Obr. 3.44: Nelinearita převodu, $f_{max}=1MHz$	53
Obr. 3.45: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=500kHz$	53
Obr. 3.46: Časové průběhy napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=1MHz$	54
Obr. 3.47: Detail časových průběhů napětí v obvodu převodníku, $f_{out}=1MHz$	54
Obr. 3.48: Nelinearita převodu všech rozsahů	55

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Hodnoty součástek použitých v zapojení převodníku napětí na frekvenci	15
Tab. 2.2: Výsledky simulace převodu napětí na frekvenci, $f_{max}=10kHz$	16
Tab. 2.3: Hodnoty součástek použité při měření obvodu	19
Tab. 2.4: Převodní charakteristika	20
Tab. 3.1: Hodnoty součástek pro nastavení požadovaného rozsahu výstupní frekvence	28
Tab. 3.2: Katalogové hodnoty nelinearity převodu napětí na frekvenci [2]	28
Tab. 3.3: Převodní charakteristika, $f_{max}=10kHz$	29
Tab. 3.4: Časové parametry výstupního signálu, $f_{max}=10kHz$	29
Tab. 3.5: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{max}=10kHz$	30
Tab. 3.6: Převodní charakteristika, $f_{max}=100kHz$	32
Tab. 3.7: Časové parametry výstupního signálu, $f_{max}=100kHz$	32
Tab. 3.8: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{max}=10kHz$	32
Tab. 3.9: Převodní charakteristika, $f_{max}=500kHz$	35
Tab. 3.10: Časové parametry výstupního signálu, $f_{max}=500kHz$	35
Tab. 3.11: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{max}=500kHz$	35
Tab. 3.12: Převodní charakteristika, $f_{max}=1MHz$	38
Tab. 3.13: Časové parametry výstupního signálu, $f_{max}=1MHz$	38
Tab. 3.14: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{max}=1MHz$	38
Tab. 3.15: Převodní charakteristika, $f_{max}=10kHz$	42
Tab. 3.16: Časové parametry výstupního signálu, $f_{max}=10kHz$	42
Tab. 3.17: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{max}=10kHz$	43
Tab. 3.18: Převodní charakteristika, $f_{max}=100kHz$	46
Tab. 3.19: Časové parametry výstupního signálu, $f_{max}=100kHz$	46
Tab. 3.20: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{max}=100kHz$	46
Tab. 3.21: Převodní charakteristika, $f_{max}=500kHz$	49
Tab. 3.22: Časové parametry výstupního signálu, $f_{max}=500kHz$	49
Tab. 3.23: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{max}=500kHz$	49
Tab. 3.24: Převodní charakteristika, $f_{max}=1MHz$	52
Tab. 3.25: Časové parametry výstupního signálu, $f_{max}=1MHz$	52
Tab. 3.26: Hodnoty součástek pro převod U/f , $f_{max}=1MHz$	52
Tab. 3.27.: Porovnání naměřených hodnot a katalogových hodnot nelinearity převodu	56
Tab. 3.28: Přístroje použité při měření	56

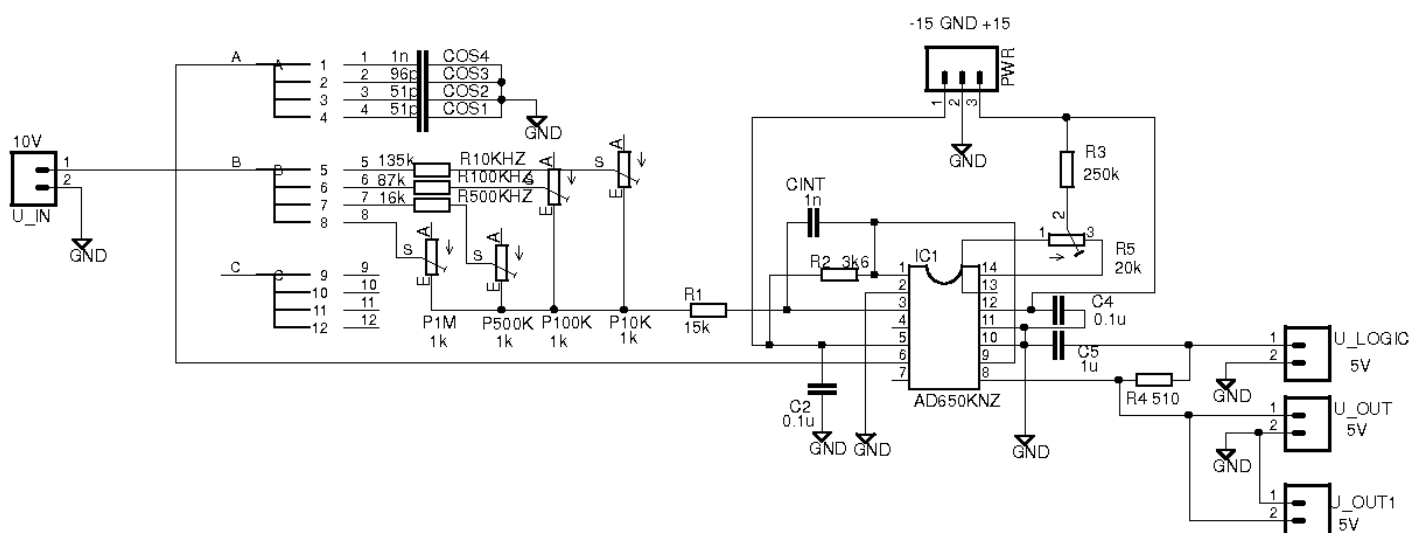
Přílohy

Příloha A – podklady pro výrobu převodníku napětí na frekvenci

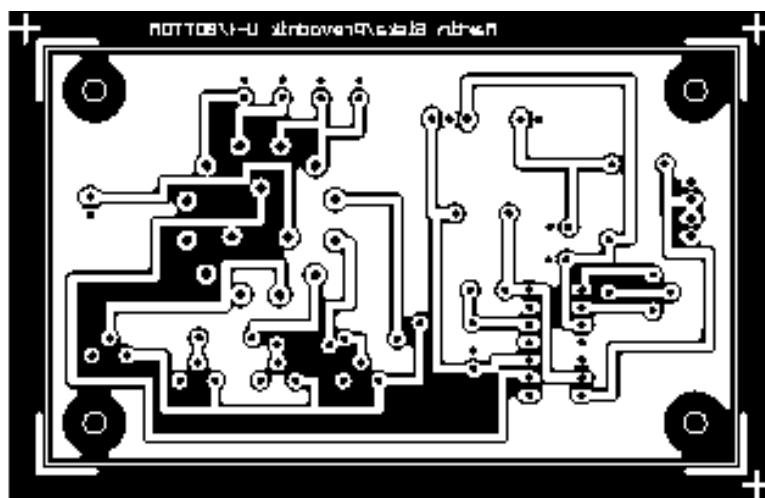
Celkový návrh plošného spoje byl proveden v programu Eagle.

Navržený převodník byl zkonstruován do podoby krabičky s několika svorkami plnícími funkci vstupních svorek, výstupních vorek, napájecích svorek a také svorek pro přívod napětí pro výstupní signál. Nedílnou součástí převodníku je přepínač rozsahů výstupní frekvence. Tento prvek vybírá vždy jednu ze 4 možných dvojic rezistor - kondenzátor.

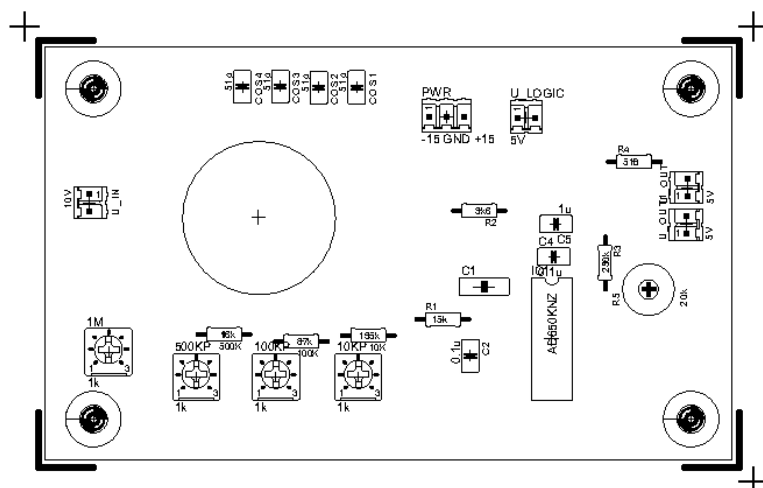
Na obrázku 1 a 3 sice uvedeny svorky ARK, které ale nakonec nebyly vůbec použity. Místo nich byly do stěn krabičky dány panelové zdířky. Tato volba je lepší pro připojení kabelů v laboratoři.



Obr. 1: Schéma zapojení převodníku napětí na frekvenci



Obr. 2: Deska plošného spoje z pohledu ze strany součástek



Obr.3: Rozmístění součástek na desce plošného spoje z pohledu ze strany součástek

Seznam součástek:

Označení ve schématu	hodnota	pouzdro	knihovna
C2	0.1u	C025-025X050	rcl
C4	0.1u	C025-025X050	rcl
C5	1u	C025-025X050	rcl
CINT	1n	C050-025X075	rcl
COS1	51p	C025-025X050	rcl
COS2	51p	C025-025X050	rcl
COS3	96p	C025-025X050	rcl
COS4	1n	C025-025X050	rcl
IC1	AD650KNZ	DIL14	ic-package
P1M	1k	B25P	pot
P10K	1k	B25P	pot
P100K	1k	B25P	pot
P500K	1k	B25P	pot
R1	15k	0204/7	rcl
R2	3k6	0204/7	rcl
R3	250k	0204/7	rcl
R4	510	0204/7	rcl
R5	20k	RTRIM3339P	rcl
R10KHZ	135k	0204/7	rcl
R100KHZ	87k	0204/7	rcl
R500KHZ	16k	0204/7	rcl

9x panelová zdířka SBZ v různých barvách

Příloha B – Laboratorní úloha, převodníky U/f

1. Zadání:

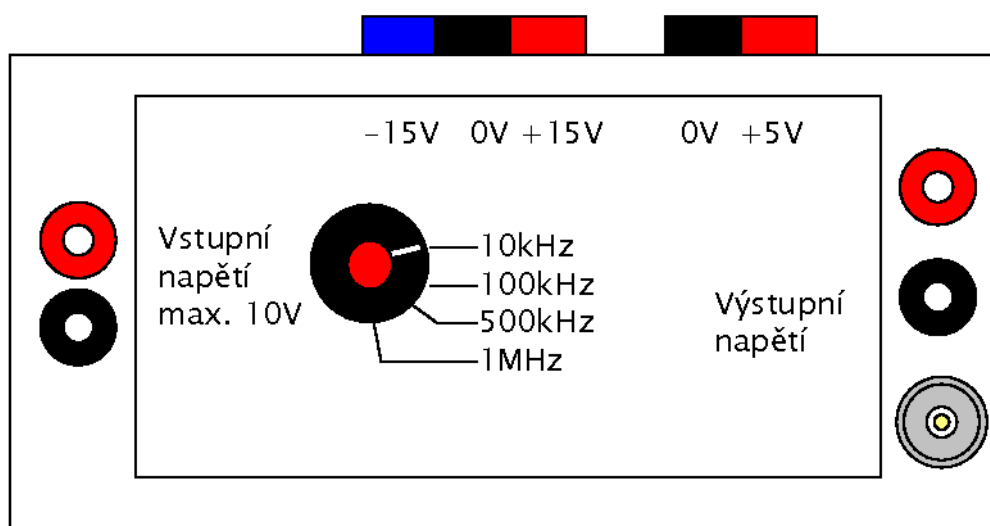
1. Seznamte se s přípravkem převodníku U/f, a z příloženého návodu prostudujte zapojení přípravku.
2. Z příloženého návodu prostudujte princip převodu napětí na frekvenci, na kterém pracuje tento přípravek
3. Proměřte převodní charakteristiku a parametry výstupního signálu pro zadaný rozsah výstupní frekvence
4. Vypočítejte nelinearitu převodu pro jednotlivé frekvence z daného rozsahu.
5. Přehledně zpracujte zprávu o měření.

2. Teoretický úvod

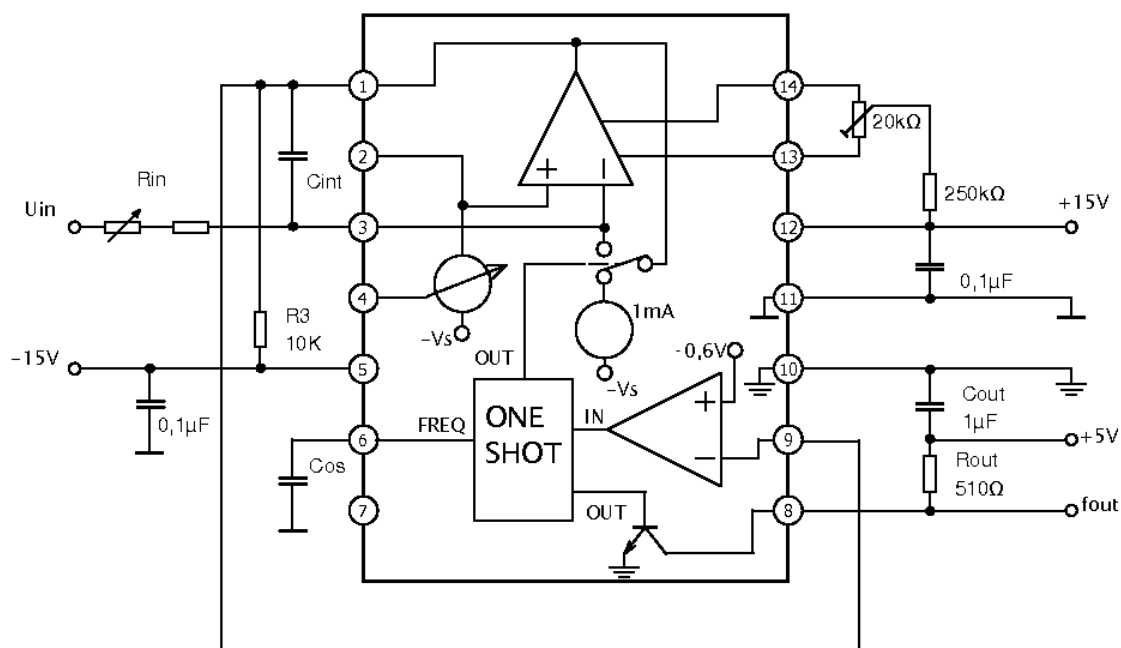
Zapojení převodníku

Převodník napětí na frekvenci je zařízení, které podle úrovně řídicího napětí mění frekvenci výstupního signálu. Na obrázku 1 je zobrazen horní pohled na převodník.

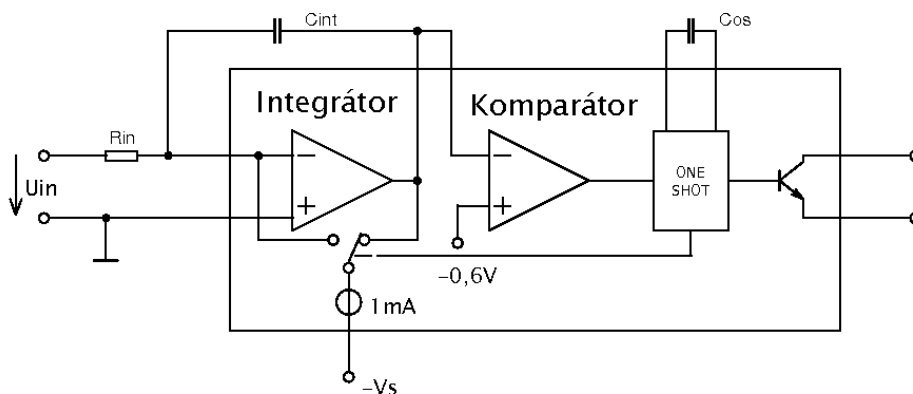
Jak je vidět z tohoto obrázku jsou zde červené, modré a černé svorky. Všechny černé svorky jsou propojeny se zemí, je tedy možné využívat všechny černé svorky, ale také například pouze jedinou. Na jediné modré svorce je záporné napájecí napětí. Na červených svorkách je vždy napětí, které je naznačeno na horní straně přípravku. V žádném případě ale nejsou propojeny tak jako černé svorky.



Obr.1: Horní pohled na přípravek převodníku



Obr.2: Vnitřní zapojení převodníku



Obr.3: Zjednodušené zapojení převodníku

Princip převodu

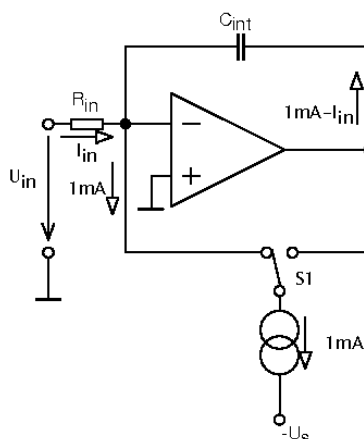
Vstupní napětí je převedeno vstupním rezistorem R_{in} na vstupní proud I_{in} . Ten nabíjí integrační kondenzátor C_{int} . Během tohoto nabíjení klesá výstupní napětí integrátoru. Jakmile hodnota výstupního napětí integrátoru protne rozhodovací úroveň komparátoru, která je v tomto převodníku $-0,6V$, překlopí komparátor své výstupní napětí ze záporné saturace, ve které bylo do teď, do kladné saturace. Na to zareaguje generátor jednotlivých pulzů, ONE SHOT, a vygeneruje pulz o délce, která je dána hodnotou kapacity kondenzátoru C_{os} . Doba tohoto pulsu je dána vztahem

$$t_{os} = C_{os} \cdot 6,8 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^{-7}, \quad (1)$$

kde t_{os} (s) je doba trvání jednoho pulzu a

C_{os} (F) je kapacita časovacího kondenzátoru.

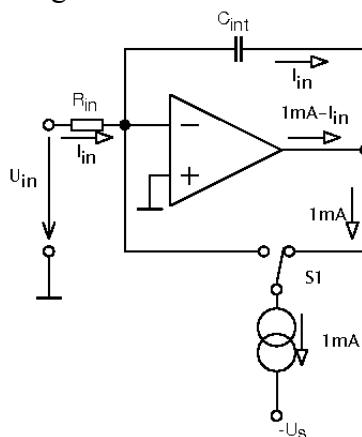
Po tuto dobu je přepínač v poloze znázorněné na obrázku 4 a probíhá tzv. resetovací fáze



Obr.4: Resetovací fáze

Během resetovací fáze se integrační kondenzátor C_{int} vybíjí a napětí na výstupu integrátoru roste. To se děje přesně po dobu jednoho výstupního pulzu, tedy po dobu t_{os} .

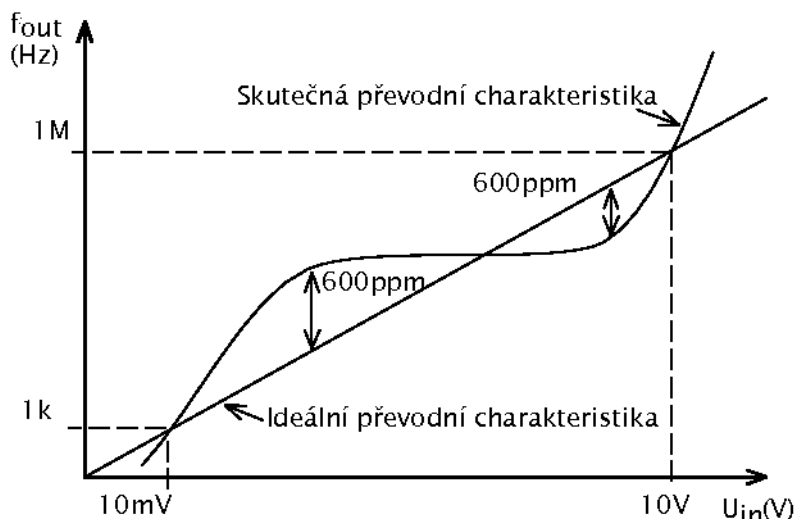
Po skončení tohoto pulzu se přepínač přepne do druhé polohy, tak jak je naznačeno na obrázku 5 a spustí se znovu tzv. integrovací fáze.



Obr.5: Integrovací fáze

Při integrační fázi celý proces začíná od začátku.

Nelinearita převodu



Obr.6: Určení nelinearity převodu

Nelinearita převodu je jeden z nejdůležitějších parametrů, který je potřeba znát u každého převodníku U/f. Požadavkem na každý převodník je samozřejmě mít nelinearitu převodu co nejnižší.

Nelinearita převodu se spočítá následujícím způsobem

$$\text{nelinearita} = \left| \frac{f_{\text{ideál}} - f_{\text{skuteč}}}{f_{\text{ideál}}} \right| \cdot 100, \quad (2)$$

kde $\text{nelinearita} (\%)$ je nelinearita převodu,
 $f_{\text{ideál}} (\text{Hz})$ je ideální hodnota frekvence a
 $f_{\text{skuteč}} (\text{Hz})$ je skutečná hodnota frekvence.

Ideální (vypočítaná) hodnota frekvence se dá nejjednodušeji zjistit při správně nastaveném převodníku podle vztahu

$$f_{\text{ideál}} = \frac{f_{\text{max}}}{U_{\text{max}}} \cdot U_{\text{in}}, \quad (3)$$

kde $f_{\text{max}} (\text{Hz})$ je rozsah výstupní frekvence,
 $U_{\text{max}} (\text{V})$ je rozsah vstupního napětí a
 $U_{\text{in}} (\text{V})$ je aktuální hodnota řídicího napětí.

3. Návod pro měření

Měření převodní charakteristiky

Přípravek převodníku přepněte na rozsah zadaný vyučujícím.

Zapojte příslušné zdroje na příslušné svorky na přípravku. Výstup přípravu můžete připojit buď za pomoci banánek nebo za pomoci BNC konektoru. Propojte přípravek s osciloskopem, případně za pomoci rozdělovacího T článku také s čítačem.

Pro vstupní napětí v rozsahu 0V – 10V odečítejte výstupní frekvenci (nejlépe na čítači) a parametry výstupního signálu (na osciloskopu).